مجلة العلوم

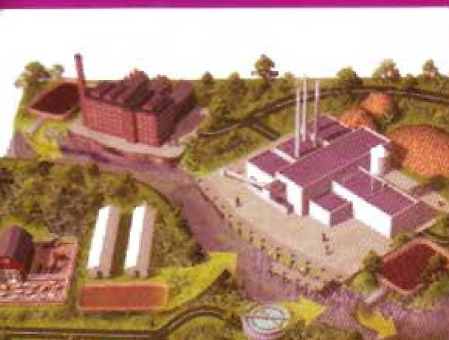
الترجمة العربية لمجلة ساينتفيك أمريكان
تصدر شهريا في دولة الكويت عن
مؤسسة الكويت للتقدم العلمي

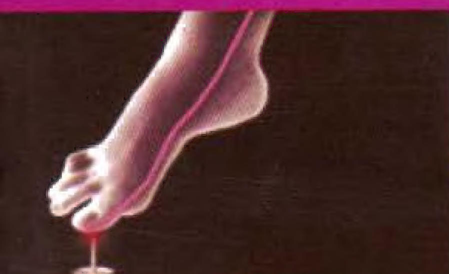
المجلد 22 - العدد 10
أكتوبر (تشرين الأول) 2006

SCIENTIFIC AMERICAN
October 2006


رؤية الطيور للألوان


طاقة لدفع طائرة فضائية


جزيئات خضراء (صديقة للبيئة)


نحو سيطرة أفضل على الألم

جينومات للجميع

العدد 222 . السعر: 1.500 دينار كويتي

«**مجلة العلوم**» تصدر شهريا في الكويت منذ عام 1986 عن «**مؤسسة الكويت للتقدم العلمي**» وهي مؤسسة أهلية ذات نفع عام، يرأس مجلس إدارتها صاحب السمو أمير دولة الكويت. وقد أنشئت عام 1976 بهدف المعاونة في التطور العلمي والحضاري في دولة الكويت والوطن العربي، وذلك من خلال دعم الأنشطة العلمية والاجتماعية والثقافية. و«**مجلة العلوم**» هي في ثلاثة أرباع محتوياتها ترجمة لـ«**ساينتفيك أمريكان**» التي تعتبر من أهم المجلات العلمية في عالم اليوم، وتسعى هذه المجلة منذ نشأتها عام 1845 إلى تمكين القارئ غير المتخصص من متابعة تطورات معارف عصره العلمية والتقانية وتوفير معرفة شمولية للقارئ المتخصص حول موضوع تخصصه. تصدر «**ساينتفيك أمريكان**» بثماني عشرة لغة عالمية، وتتميز بعرضها الشيق للمواد العلمية المتقدمة وباستخدامها القيم للصور والرسوم الملونة والجد ول

مقاريب المستقبل العملاقة(*)

<R. كيلموتسي>



يفيد المدلول الفلكي لقانون مور Moore أن حجم المقاريب يتضاعف كل بضعة عقود. لكن المصممين في هذه الأيام يعتقدون أن بمقدورهم بناء مقراب أكبر ثلاثَ أو أربعَ، أو حتى عشرَ مرات، خلالَ عقد واحد من الزمن.

بعض أحسن أوقاتي، في مرصد بارنال[1] بجمهورية تشيلي، أمضيها ليلا، وذلك عندما أذهب بعد يوم من العمل إلى ما نسميه «السطح العلوي»، وهو المنصَّة التي تحتضن المقاريب الأربعة التي يبلغ قطر الواحد منها ثمانية أمتار، والتي يتالف منها مشروع المقراب البالغ الضخامة Very Large Telescope (VLT). فكل شيء هناك ساحر خلاَّب: الامتداد الواسعُ للسماء النجمية والحركاتُ السَّلسةُ للقباب والمتعة غير المستحبة التي تغمرني عندما أدخن غليوني والصحراءُ المظلمةُ التي يصعبُ رؤية حدودها مع الأفق بسبب سطوعه الضعيف. وخلال وقوفي هناك متأملا بإعجاب المقراب VLT ـ أكثر مجموعة من المقاريب تطورا في العالم ـ ومتمتعا بمنظر آلاته الأربع التي تزن 430 طنا، وتدور بهدوء وكأنها تؤدي مع السماوات رقصة باليه معقدة، كنت أفكر مليا في حظي السعيد الذي ساقني إلى العمل في مثل هذا المشروع الرائع. وإنه لإنجاز باهر أن تشارك البشرية كلها بالإسهام فيه. وكما هي الحال في جميع المقاريب الضخمة الأخرى الموجودة في أيامنا هذه، مثل مرصد كيك Keck Observatory ومقراب هبل الفضائي Hubble Space Telescope والمقراب Very Large Array، يشتمل المقراب VLT على أعلى التقانات التي تَعَيَّن على حضارتنا إبداعها. وإذا تَحَرَّيْتَ أصل كلِّ جزء من المشروع، توصَّلْتَ إلى أن إنجازه تطلَّب، في النهاية، جهودَ ملايين من الناس.

لكن الفلكيين لا يكلّون ولا يملّون. فما إن اكتمل بناء المقراب VLT، حتى شرع كثير منا في التفكير بمقاريب تخلفه، تراوح أقطار مراياها الأولية ما بين 25 و 30 مترا، أو حتى 100 متر. وإحدى الأفكار التي كانت تدور في ذهني تصميم مقراب أسطوري اسمه OWL (وهذه الأحرف الثلاثة هي الأحرف المائلة في الكلمتين *O*ver *Wh*elmingly *L*arge، أي «كبير بقدر هائل»)، يسمح برصد ليلي رائع، وتملأ مرآته الضخمة، التي قطرها 100 متر، السطحَ العلويَ كله تقريبا لمرصد بارانال.

وكما هي الحال في جميع الآلات العلمية

(*) THE GIANT TELESCOPES OF THE FUTURE

(1) Paranal Observatory

البالغ الضخامة(VLT) [بدون بصريات تكيفية]
قطر المرآة: 8.2 متر
الميز: 0.4 ثانية قوسية
مدة التعريض: 620 ثانية

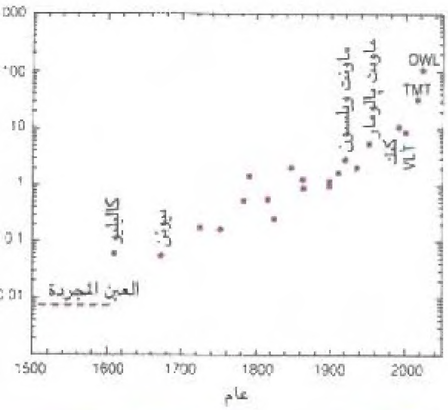
من لطخة غير واضحة إلى مَعْلَم واضح: يحظى مقراب ضخم مزوَّد ببصريات تكيفية، برؤية أكثر حدّة من رؤية حتى مقراب هبل الفضائي [تستند هذه المحاكاة إلى صورة المقراب VLT للضوء تحت الأحمر القريب الصادر عن منطقة التكون النجمي NGC 3603].

الجديدة. فإن المقاريب العاملة في هذه الأيام، التي قياس أقطارها يراوح ما بين 8 و 10 أمتار، لا تقتصر على تقديم إجابات عن الأسئلة التي بنيت من أجلها. إنما أيضا تطرح أسئلة جديدة أكثر عمقا وتحديا تتطلب معالجتها آلات أكبر. فتحليل تركيب الكواكب الشبيهة بالأرض في منظومة نجمية أخرى؛ والبحث عن آثار للحياة عليها؛ ودراسة أولى المجرات التي نشأت في الكون؛ وفهم طبيعة المادة العاتمة والطاقة العاتمة؛ وتصوير حشود الأجسام في منظومتنا الشمسية التي تقوم السفن الفضائية بدراستها ـ كل هذا يدفع الفلكيين إلى التفكير في جيل من المقاريب الضوئية العملاقة التي تتجاوز قدراتها قدرات المقاريب المتوافرة في هذه الأيام بمئات أو آلاف المرات. وقد ارتأت وكالات أوروبية مختلفة أن مثل هذه المقاريب تشغل قمة أولويات علم الفلك؛ وترى أكاديمية العلوم الوطنية الأمريكية أنه لا يعلو على هذه المقاريب سوى وريث مقراب هبل الفضائي، وهو **مقراب جيمس ويب الفضائي** James Webb Space Telescope (JWST). ويوجد الآن عدد من المشاريع التي يجري التفكير فيها، ومن ضمنها المقراب OWL **ومقراب الثلاثين مترا** Thirty Meter Telescope (TMT) **ومقراب ماجلان العملاق** Giant Magellan Telescope (GMT) الذي قطره 24 مترا.

ومن الناحية التاريخية، خضعت المقاريب للمدلول الفلكي لقانون مور، إذ كان كِبَرُ مقاريب كل جيل منها يُعادل تقريبا ضعف كبر مقاريب الجيل السابق له، وكان الانتقال من جيل إلى الجيل الذي يليه يستغرق عدة عقود. وهذه النزعة إلى تطوير بناء المقاريب توضحها «متتالية كاليفورنيا»[1] الآتية، التي تبيّن تسلسل بناء المقاريب خلال القرن العشرين: مقراب هوكر[2]، المقام على ماونت ولسون، والذي قطره 2.5 متر (1917)، مقراب هيل[3] الذي بُني على ماونت پالومار، والذي قطره خمسة أمتار (1948)، مقرابا كيك[4] التوأمان المقامان على ماونت ولسون في ماونت كيا بجزيرة هاواي (1993). بعد هذا المقراب، يجب أن يكون قطر مقراب الجيل التالي نحو 20 مترا، وأن يبدأ عمله عام 2025 تقريبا. تُرى، هل هؤلاء الذين يقترحون معنا بناء مقاريب تراوح أقطارها ما بين 25 مترا و100 متر بحلول منتصف العقد القادم قد فقدوا رشدهم؟ إن إلقاء نظرة عن كثب على تحديات بناء مقراب قد يجعلك تؤمن بسلامة عقول هؤلاء الفلكيين. فبناءُ مرصد أرضيٍّ ضخم ضروري لا لأن الحاجة إليه ملحّة فحسب، وإنما أيضا لأن معظم التقانات اللازمة لإنشائه متوافرة.

مدى التحسينات[**]

يتجلّى الدافع القوي لتحدي قانون مور فيما يخص المقاريب في أنه لم يَعُد لدى الفلكيين من خيارات لتحسين قدرة أجهزتهم الحالية على تجميع الضوء. ففي مقراب عاكس، يرتد الضوء أولا عن مرآة أوّليّة، ثم يصطدم بمرآة ثانوية لتتجمّعه في بؤرة



ستواصل المقاريب المقترح بناؤها، مثل OWL و TMT، نزعتها التاريخية إلى زيادة مساحة فتحاتها

(محرق) موجودة في موقع ملائم يمكنك رؤيته بعينك، أو تأخذ صورة له، أو تحلّله إلى مجموعة متنوعة واسعة من ألوان التحليل الطيفيّ. وعندما يتحدث الفلكيون عن حجم مقراب، فهم يقصدون قطر مرآته الأوّليّة. وتسمح لك مضاعفة هذا القطر برؤية أجرام سماوية بالسطوع نفسه، لكن عندما يتضاعف بعدها عنك.

وخلال السنوات الخمسين الأخيرة، صارت المقاريب أشد حساسية للأجسام ذات الضوء الباهت. ولا يعود السبب في ذلك إلى تكبير قطرها فحسب، وإنما أيضا إلى الإنجازات التي تحققت في تقانة **المكشافات** detectors. وخلال بناء مقراب هيل، الذي قطره خمسة أمتار، جرى تجهيزه بصفائح فوتوغرافيّة لا تسجّل سوى بضعة أجزاء في المئة من الضوء الساقط عليها. لكن فعالية المكشافات الإلكترونية في هذه الأيام قريبة من 100 في المئة ـ وهذا يؤدي إلى تحسن في الحساسية يعادل زيادة في القطر خمس مرات. لذا فإن الجيل الحالي من المقاريب هو في الواقع أكبر من أسلافه 10 مرّات. وكي يقوم الجيل التالي بإنجاز القفزة نفسها، في ظروف لا تسمح إلاّ بمجال محدود جدا

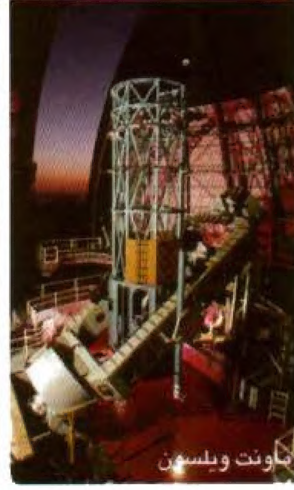
نظرة إجمالية/ المقاريب الكبيرة جدا جدا[*]

- **الحجم مهمٌّ في علم الفلك. فالمقاريب الكبيرة قادرة على كشف أبهت الأجرام السماويّة والحصول على صور أشدّ وضوحا. ولأكبر المقاريب الحالية للضوء المرئي والضوء تحت الأحمر القريب مرايا أقطارها تراوح ما بين 8 و 10 أمتار. ويعكف الباحثون حاليا على دراسة الجيل التالي من المقاريب التي تمتد أقطارها من 20 مترا إلى عدد أسطوري يصل إلى 100 متر.**
- **مع أن المقاريب مقامة على الأرض، فستزوَّد بتقانة البصريات التكيفية لتعطيل آثار الضبابيّة التي يحدثها الجوّ. وفي الحقيقة، ستزودنا هذه المقاريب بصور أوضح كثيرا من تلك التي يوافرها مقراب هُبل الفضائي وبتكلفة أقل. وتسمح هذه الآلاتُ الجديدةُ بإنجاز عدة مهمّات تتجاوز قدرات المقاريب الحالية، مثل البحث عن كواكب تدور حول نجوم أخرى، وتحليل تركيب ما تكشفه منها.**

(*) Overview: Very, Very Large Telescopes
(**) Scope for Improvement
(1) California progression
(2) Hooker telescope
(3) Hale telescope
(4) twin Keck telescopes

المسار الزمني لتطور المقاريب(*)









لإحراز مزيد من التقدم في فاعلية المكشافات، فلا بدّ أن تكون أقطار المقاريب 100 متر

ومع أن ثمــــة حــــوارا وديًا، إن صح التعبير، يدور بين مؤيدي التصاميم المختلفة لمقاريب المستقبل حول أكبر قطر يمكنهم بلوغه واقعيًا، فلا يشكّكُ أيٌّ منهم في الحاجة إلى إعطاء الجيل التالي من المقاريب دفعة إضافية في حجمها. وتقليديا، ظلّ حجمُ المقاريب في التصاميم الجديدة محدودا بالقدرة على إنتاج زجاجٍ مرآوي يمكن صبُّهُ ليتخذَ الشكلَ المطلوبَ، ثم صقلُهُ. ولما كان للضوءِ المرئيّ طولٌ موجيٌّ أقصرُ من طول الموجــات الراديوية، لذا، وعلى الرغم من إمكان جــعل الأطبــاق الراديويّة بالغــة الضخامة، فإن متطلباتها أقلّ صرامة بكثير من متطلبات المرايا الضوئية. ولتمثيل هذا الفرق بين المتطلبات نقول إنّ المحرّكَ الذي تحتاج إليه للتحكم في حمل حبة من الرمل يختلف عن المحرّك اللازم لحمل صخرة.

لقراب هيل الذي قطره خمسة أمتار مرآة لها شكل مجسم القطع المكافئ(1). ودقة استواء سطحها 50 نانومترا. ولو كانت مساحتها تعادل مساحة مرآة أتلانتيك أوشن(2) لكان ارتفاع أكبر نتوء على سطحها خمسة سنتمترات. وقد استعملَ صانعوها لصقلها أداة صقلٍ خشبية مغطاة بالقارْ. وفي المراحل الأخيرة من العمليّة، صقلوا بعض أجزائها يدويا. وقد استغرق إنجازُ هذه المهمة 11 سنة (من ضمنها سنوات الحرب العالمية الثانية)، وخلال تلك المدة، كانت قياسات شكل المرآة تُؤْخذُ كلَّ يومين.

ويُضْــبَطُ شكلُ المرايا في هذه الأيام بتحكّمٍ حاسوبيٍّ، وهذا يختصر كثيرا من مدة إنجازها. وقد استغرقَ صقلُ كلٍّ من مرايا VLT الأربع التي قطرها 8.2 متر سنة واحدة، وكانت القياسات تُؤْخَذُ دون انقطاعٍ تقريبا. وتعادل جودةُ سطوحها، أو تتجاوز قليلا، جودة مرآة هيل، مع أن شكلها (مجسم قطعٍ زائد(3) وهو يُحْدِثُ أشد تركيز بؤري ممكن) أكثر تعقيدا بكثير. لذا، لم يعد يمثّلُ الصقلُ حجرَ عثرة رئيسيا.

وثمة مشكلة أصعب، هي تصنيع الزجاج نفسه. فبغية صبّ قطع زجاج قطرها ثمانية أمتار، تعيّن على صانعي المقاريب أن يقيموا معامل خاصة لهذا الغرض، وأن يسلكوا طريقا تجريبيا وعرا. إذْ كانوا غالبا يصنعون عدة مرايا ثم يكســرونهــا قبل توصّلهم إلى المرآة المنشودة. ولا ترقى الإجراءاتُ الحاليّةُ إلى بلوغ حتى ضعف الحجم. ولحسنِ الحظ، فقد قدّمَ الحلَّ الفلكيُّ الإيطاليُّ «G. H. دارتورو» عام 1932: إنه المرآة المكوّنةُ من عدة قطع. وعلى سبيل المثال، فإن مرآتي مقراب كيك التوأمي مكونتان من 36 قطعة، كل منها مسدس قطره 1.8 متر. ويسمح الشكل السداسي لهذه القطع بالتصاق بعضها ببعض التصاقا محكما لملء سطح مجسم القطع الزائد. ولكل من هذه القطع شكل مختلف قليلا، يتوقف على بعد القطعة عن مركز المرآة. ومن حيث المبدأ، يمكن تكييف تصميمها لتتلاءم مع أي مساحة للمرايا. لكن الوجه السلبي لهذه العمليّة هو الحاجة إلى رصفِ القطعِ بدقة الأطوال الموجيّة الجزئيّة، وذلك للتقليل إلى الحد الأدنى من أثر الوصلات في جودة الصورة، وللإبقاء على التصاقٍ جيد للقطع بعضها ببعض على الرغم من الرياح العاتية التي تهب عليها

وكما هي الحال في مقراب كيك، فإن مقرابي OWL و TMT سيتكوّنان من قطع سداسية الشكل. لكن مصممي مقراب GMT سلكوا طريقا آخر. فبغية تقليل عيوب صنع المرآة من مجموعة من القطع إلى حدها الأدنى، فقد قرروا إنتاج عدد أقل من القطع، لكن بحجم أكبر. وسيكون مقرابهم مكوّنا من سبع مرايا دائرية قطرها 8.4 متر (أولاها دخلت مرحلة التصنيع فعلا، وذلك للبرهان على صحة المبدأ الذي ارتضوه)(4). والسبب في اعتماد هذا الأسلوب هو صعوبة متابعة السير في عملية التكبير شوطا أبعد من ذلك.

(*) A Timeline of Telescopes

(1) paraboloid

(2) Atlantic Ocean

(3) hyperboloid

(4) أنظر "Breaking the Mold," by W. W. Gibbs. *Scientific American*, December 2005

رؤية لمقراب من النمط OWL(٢)

سيكون مقرابٌ حجمه 100 متر أكبر 10 مرات من أيّ آلة ضوئية كبيرة بُنيت حتى الآن. لكنْ ثمة عدد من الابتكارات التي ستُبقي تكلفته في حدود بليون يورو (1.2 بليون دولار تقريبا) ـ وهذا مبلغ أقل من تكلفة مقراب فضائي. ويشمل هذا السعر مكشافات وبُنى تحتية وكذلك أموالا احتياطية للمصروفات الطارئة.

المرآة الثانوية

هذه المرآة [التي توجِّه الضوءَ النجميَّ إلى المصحِّح] مكوَّنة من 216 قطعة. ولتسهيل المتطلَّبات الميكانيكيّة، تتخذ المرآة شكلا مستويا لا شكلا منحنيا.

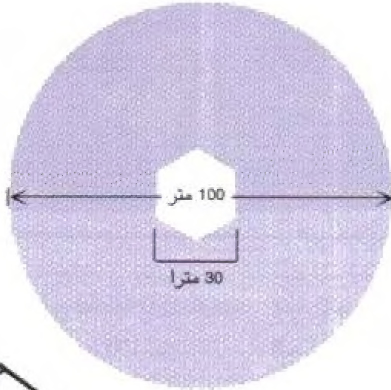
التكلفة التقديرية: 30 مليون يورو

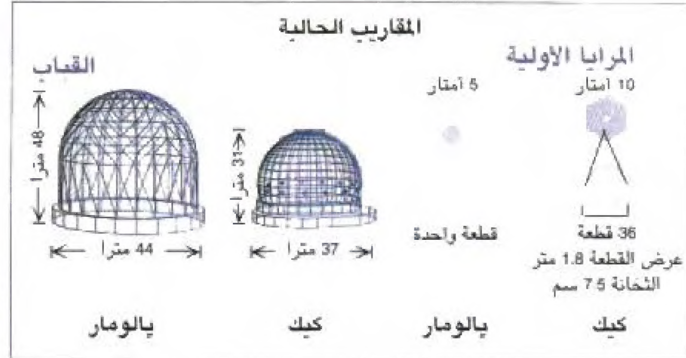
المرآة الأوَّليّة

تتكوَّن المرآة الأوَّليّة [التي تُجمِّع الضوء النَّجمي] من 3048 قطعة سداسية الش... وللاقتصاد في النفقات، تغطي هذه الق... سطحا كرويا بدلا من مجسمات القطو... المكافئة أو الزائدة العادية.

التكلفة: 290 مليون يورو







العرض: 220 مترا
الارتفاع: 95 مترا

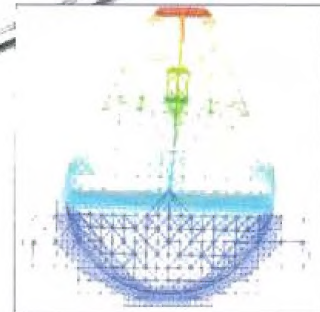
الغطاء

يؤدي وزنُ قبة قطرها 100 متر من النمط الدوّار المألوف إلى كسر حافتها. ومن ثَم فالمقراب يعمل في الهواء الطلق، ويغطى بغطاء بسيط [لكنْ ضخم] سحَّابٍ لوقاية المقراب في الطقس العاصف.

التكلفة التقديرية: ما بين 70 و 150 مليون يورو

المرايا الأولية

مبنى الخدمات





آليات الدفع

يزن المقراب نحو 000 15 طن ـ وهذا بالغ الثقل لتركيب mounts المقاريب العادية. وبدلا من ذلك يُركَّب على عربات نقلٍ منخفضة(١) تسير على سكك دائرية.

التكلفة التقديرية: 30 مليون يورو

البنية

ينثنوه الهيكلُ الداعمُ تناظريا حين إمالته نحو الأفق مبقيا المرايا متراصفة. ويتغير الانزياح الأفقي من 0 [*اللون الأزرق*] إلى 0.6 مليمتر [*اللون الأحمر*]. ومع أن البنية تبدو وكأنها تغطي المرآة، فهي لا تحجب إلا نحو 3 في المئة من الضوء الوارد.

التكلفة التقديرية: 185 مليون يورو

(١) ...ogies
(٢) Vision for an Owl



مرآة ثانوية



المصحح

بعد ارتداد الضوء عن المرآتين الأولية والثانوية، يدخل إلى المصحح المكوّن من أربع مرايا صغيرة [غير مبيّنة في الشكل بالنسب الحقيقية لقياساتها] مهمّتها إزالة تشوهات الصور.

التكلفة التقديرية: 55 مليون يورو للمرايا؛ 100 مليون يورو للبصريات التكيفية

البحث عن رؤية(*)

ليست حساسية المقاريب للأجسام الباهتة الضوء سوى إحدى المواصفات المنشودة لهذه الآلة. وثمة مواصفة أخرى هي الميز(2). ومن حيث المبدأ، يجب أن يكون المقراب الكبير قادرا على توفير كلتا المواصفتين. وكلما كَبُرَ المقراب، قلَّ فساد الصور نتيجة الانعراج(3)، الذي يتسبب في اللطخات(4) التي تحدث عندما تغير الموجة الواردة اتجاه جبهتها بسبب الحافة الخارجية للمرآة. بيد أن الانعراج كان، حتى عهد قريب، مسألة فيها نظر عندما يتعلق الأمر بالمقاريب الضوئية المقامة على الأرض. فحتى في أفضل المواقع لبناء المراصد، يجعل اضطرابُ الهواء أيَّ شيء، انفراجه الزّاويّ أصغر من 0.3 ثانية قوسية، ضبابيا وغير واضح المعالم. وإذا وَجَّهْتَ نَظَرَكَ إلى نجم منكب الجوزاء(5) العملاق (0.05 ثانية قوسية) بواسطة مقراب بالومار، الذي حجمه خمسة أمتار وتكلفته 100 مليون دولار، فكل ما تراه نقطة متلألئة من الضوء الأحمر تبدو أسطع، لكن ليست أوضح، مما يمكن رؤيته بالعين المجردة.

وتعاني المقاريب الفضائيةُ مشكلة معاكسة، إذ إنها تقدم صورا عالية الميز، لكنها تفتقر إلى حساسية رؤية أضعف الأجسام ضوءا؛ هذا إذا تجاوزنا حقيقة شطرها للضوء إلى عدة ألوان نتيجة تحليلها لمكوناته. لقد حَدَّدَ حجمُ المكوك الفضائيِّ قطر مقراب هبل الفضائي بمقدار 2.4 متر، وحتى قطر مرآة المقراب JWST، فستكون 6.5 متر. هذا ويجب إجراء التحليل الطيفيِّ لما تكتشفه السَّواتل(6) من الأرض.

هذه المبادلة(7) بين الحساسية والميز شيءٌ غيرُ مستحسن للجيل التالي من المقاريب، التي تتطلب أهدافُها العلميةُ تَحَقُّقَ كليهما في وقت واحد. وخلال تعريض مقراب قطره 100 متر للضوء طوال إحدى الليالي، فسيكون قادرا على رؤية أجرام سماوية سطوعها يعادل جزءا في الألف من أضعف سطوع رآه الفلكيون حتى الآن. وحيث ترى المقاريب الحالية لطخة سوداء في الفضاء، يرى ذلك المقراب حشدا من الأجسام المعتمة. وفي غياب ميْز عال، يندمج جميع هذه الأجسام معًا.

إن اجتماع الميْز العالي والحساسية العالية مهمٌّ جدا لاكتشاف كواكب شبيهة بالأرض خارج المنظومة الشمسيّة ولرؤية هذه الكواكب، التي سطوعها أقل من جزء في البليون من سطوع النجم الذي تدور حوله. يتعيّن على الفلكيين حَجْبُ النجم باستعمال قرص صغير عاتم يُسمّى راسم الإكليل(8). إلاّ أنه إذا كان هذا القرص كبيرا جدا، حَجَبَ الكوكب أيضا. ويعني الميْزُ العالي أنّ بمقدور الفلكيين استعمالَ قرص صغير. وهذا يزيد من عدد الكواكب التي يكتشفونها. وأصغر حجم لمقراب يمكنه مسح مجرتنا بحثا عن كواكب لها مدارات شبيهة بمدار أرضنا هو 80 مترا تقريبا. وباستطاعة هذا المقراب أن يُجري عمليات بحث في رقعة من الفضاء تتضمن نحو 400 منظومة نجمية شبيهة بمنظومتنا الشمسية، وأنْ يقومَ بتحليل طيفيٍّ لقرابة 40 كوكبا من الكواكب الشبيهة بالأرض، إن وُجِدَ مِثْلُ هذه الكواكب. وللحصول على طيف أيٍ من هذه الكواكب، يتعيّن على المقراب تجميعُ الضوء طوالَ أسابيعَ، وهذا قد يكون مستحيلا.

طَوِّرْ وتَكَيَّفْ(**)

لبلوغ هذا الميز العالي، يجب أن يعتمد المقراب على البصريات التكيُّفيَّة(9) لإزالة التشوهات التي تحدثها الاضطرابات الجوية. ولتحقيق هذا الغرض تُجرى مراقبةُ نجمٍ مرجعيٍّ (يمكن أن يكون «نجما» صنعيا يتولد بواسطة إضاءة ليزر في طبقات الجو العليا)، ويُعدَّلُ شكل مرآة أخرى أصغرَ موضوعة بين المرآة الثانوية والمكشافات. وتقوم مجموعة من المكابس الصغيرة، أو المحفِّزات(10)، بدفع القسم الخلفيِّ من المرآة لتعديل شكلها.

ويُمَكِّنُ هذا النظامُ مقرابا من العمل

(*) Vision Quest
(**) Evolve and Adapt
(1) sensors
(2) the resolving power، أي القدرة على تمييز التفصيلات الدقيقة
(3) diffraction
(4) blurring ring
(5) star Betelgeuse
(6) satellites
(7) trade-off
(8) coronograph
(9) adaptive optics
(10) actuators

بميزه الأعلى، أو قريبا منه. وكأن الجو غير موجود ـ ولا يحدّ من ذلك إلاّ انعراج الضوء. ويتعين على مقراب قطره 100 متر أن يكون قادرا على رؤية أشياء انفراجها الزاوي 0.001 ثانية قوسية. وهذا أفضل أربعين مرّة من قدرة مقراب هبل على رؤية تلك الأشياء. وبواسطة مثل هذا المقراب لا يبدو منكب الجوزاء مجرد نقطة من الضوء، بل صورة ذات 3000 بكسل، مقدّمة مستوىً من التفصيل غير متوافر حاليا إلاّ في الكواكب القريبة.

وتُستعمل هذه التقنية على كثير من المقاريب الكبيرة، بيد أن جعلها تعمل في الأنظمة التي لها حجم أكبر يتطلب تضخيمها. لكنْ ليس من الواضح البتة أن هذا المتطلّب ممكنُ التحقيق. إن استخدام نظام بصريات تكيّفية على مقراب قطره 100 متر يستلزم أكثر من 100 000 محفِّز. وتجدر الإشارة إلى أن لأنظمة هذه الأيام 1000 مُحفِّز على الأكثر. ويتعين على حاسوب التحكّم أن يكون قادرا على تغيير شكل هذه المرآة عدة مئات من المرات في الثانية، لكن تقانة المعالجات لم ترْقَ إلى هذا المستوى بعد.

ويسلك المهندسون في هذا الموضوع أسلوب الإنجاز على مراحل، وذلك ببنائهم أولا أنظمة تعمل بأطوال موجية تحت حمراء، وهذه تحتاج إلى عدد أقل من المحفِّزات، لأن شدة أثر الاضطراب تقلّ مع ازدياد الأطوال الموجية. ويجب على المهندسين أيضا أن تكون لديهم القدرة على الإفادة من الجهود المبذولة في تطوير بصريات تكيّفية متقدمة للطب والطيران الفضائي والرقابة العسكرية والإلكترونيات المستهلكين. وثمة تقنية جديدة واعدة بوجه خاص هي البصريات التكيفية المتعددة الترافق[1] التي تُجري التصحيحات المتعلقة بالاضطراب على ساحة واسعة للرؤية. وهذا يجعل الأنظمة غير مقصورة على اللطخات الصغيرة في السماء المحيطة بنجم مرجعي[2]. ويعكفُ مشروع VLT حاليا على دراسة الاستعمال الفعّال للبصريات التكيفية المتعددة الترافق.

ويمكن لقياس التداخل[3]، وهو تقنية تدمج الضوء الوارد من أكثر من مقراب، إنجازُ مَيْزٍ أعلى حتى من ميز المقاريب الكبيرة المقترحة[4]. وتطبَّق هذه التقنيةُ في مرصد بارانال. هذا وإن المقاريب VLT الأربعة مبنيّة في مواقع تفصل بينها مسافةُ 130 مترا، ومن ثَم يولِّد دمجُ ضوئها الميز نفسه الذي يوافره مقراب قطره 130 مترا. وهذا يزودنا بتفصيلات رائعة عن الأجسام التي تدرسها تلك المقاريب. بَيْدَ أن لمقاييس التداخل محدوديتها، إذ إنها لا يمكن أن ترْصُدَ سوى ساحة صغيرة للرؤية، فاستعمالها يشبه النظر عبر ماصّة شراب. يضاف إلى ذلك أنّ تعقيد أدواتها البصرية يجعلها قادرة على استعمال نسبة مئوية صغيرة جدا من الضوء الذي تجمعه، مقابل نسبة 50 في المئة أو أكثر من الضوء الذي تجمعه المقاريب العادية. وفي جميع الأحوال، تعادل المساحةُ الكليّةُ لتجميع الضوء مجموعَ مساحات تجميع المقاريب الأربعة فقط. وباختصار، إنها، مثل المقاريب الفضائية، تزيد من ميْزها بتخلّيها عن الحساسية. ومن ثم فهي ليست بديلا عن مقراب عملاق مُقام على الأرض.

عزَقاتٌ ومسامير ملولبة[*]

لا ينمو الفيل مثل النملة. فازدياد وزن مخلوق يتناسب طرديا مع مكعب زيادة أبعاده الخطيّة، في حين يتناسب تزايد قدرة الهيكل العظمي على حمل ذلك الوزن طرديا مع المربع فقط لزيادة هذه الأبعاد. ومن ثم فالفيل بحاجة إلى سيقان أضخم كثيرا نسبيا. وما يصح في الثدييات الأرضية الكبيرة يصح أيضا في المقاريب. فجميع التقانات الضوئية المتقدمة في العالم لا تحظى بأي قيمة تقريبا إذا لم يكن هيكل المقراب قادرا على حمل وزنه. ومع أن الخبراء في علم الفلك الراديوي بنوا أطباقا قابلة للتوجيه تصل أقطارها إلى 100 متر، فإن المتطلبات الميكانيكية للمقاريب الضوئية أشد قساوة لأنها تعمل بأطوال موجيّة أقصر كثيرا.

ويجب أن تكون صلابة هيكل المقراب كافية لإبقاء المرايا متراصفة تماما إحداها مع الأخرى ولمقاومة الاهتزازات التي تحدثها الرياح. وتميل المقاريب القليلة الارتفاع والعريضة إلى أن تكون أصلب من المقاريب المرتفعة النحيلة، لكنها تتطلب حَنْيَ الضوء ليتّجه بدقة أعلى إلى البؤرة، وهذا يعقِّد تصميمها الضوئي. لذا يجب على المهندسين أن يتوصلوا إلى توازن بين المتطلبات الميكانيكية والضوئية. ولا يزال المقراب VLT يهتز إلى حد ما بفعل الرياح، لكن مرآته الثانوية تلغي آثار هذه الاهتزازات بحركتها بالاتجاه المعاكس نحو 70 مرّة في الثانية. وسيفعل المقراب OWL الشيء نفسه.

وثمة مشكلة محتملة أخرى هي أنه خلال تعقّب المقراب الأجرامَ السماوية ينزاح مركزُ ثقله، وهذا قد يؤدي إلى حَنْي الآلة والإخلال بتراصف المرايا. وتستعملُ معظمُ المقاريب الضخمة بنية هيكليّة صمّمها المهندس <M. سيروريير> لمقراب پالومار في الثلاثينات من القرن الماضي. وفي هذا التصميم، تُثبَّت كلٌّ واحدة من المرايا بإطار مفتوح شبيه بالصندوق مكوّن من أربع دعامات مثلثة الشكل. وحين إمالتها، تنثني الأطر وتنزاحُ المرايا جانبياً. بيد أنه لمّا كانت كلُّ مرآة مثبتة بإطار من النمط نفسه، فكلتا المرآتين تنزاحان بالقدر نفسه، وهذا يبقيهما متراصفتَيْن

مقراب قطر مرآته ثلاثون مترا (TMT)



القطر	30 مترا
التكلفة التقديرية:	700 مليون دولار
التصميم	مرآة أولية مكونة من عدة قطع
موقع الوب:	www.tmt.org

(*) Nuts and Bolts

(1) multiconjugate adaptive optics

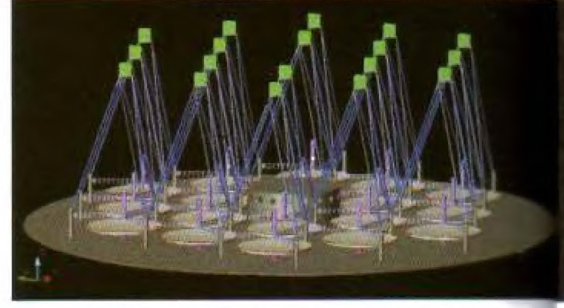
(2) انظر: "Three Star Performance," by G.P. Collins, Scientific American, May 2000

(3) interferometry

(4) انظر: "A Sharper View of the Stars," by A.R. Hajian - J. Th. Armstrong; Scientific American, March 2001

مقاريب مقترحة أخرى(*)

...يف مرايا ذات فتحات كبيرة (LAMA)



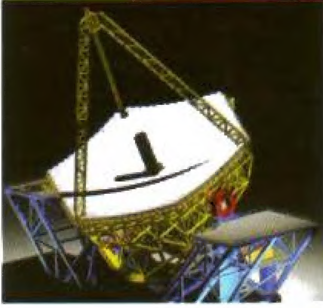
...ترا [المساحة المكافئة لتجميع الضوء]، 54 مترا [الميز المكافئ]
...ليون دولار
...مرآة من الزئبق السائل، ولكلٍّ منها شكل مجسّم قطع مكافئ؛ وقطر ...ه 10 أمتار، وجميعها موجهة إلى الأعلى.
www.astro.ubc.ca/L...

مقراب ماجلان العملاق (GMT)



21.4 متر (المساحة)، 24.5 متر (الميز)
500 مليون دولار
سبع مرايا لها شكل مجسم قطع زائد، قطر كل منها 8.4 متر، ومحمولة على حمولة واحدة
www.gmto.org

يورو 50



50 مترا
700 مليون دولار
مرآة أولية مكوّنة من قطع لها شكل مجسم قطع ناقص
www.astro.lu.se/-torben/euro50

ويسلك تصميم المقراب OWL طريقة مشابهة، لكنه يتميز بإمكان بنائه من بضع مكوّنات أساسية.

يقع الوزن الإجمالي لهيكل المقراب بين 10 000 طن و 15 000 طن، وهو يتوقف على الاختيار النهائي لمادة المرآة. وبغية المقارنة، نذكر أن وزن برج إيفل كان نحو 10 000 طن عندما اكتمل بناؤه. ومع أنه يبدو عملاقا، فهو أخف كثيرا نسبيا من مقاريب هذه الأيام. فلو كَبُرَتْ أحد المقاريب VLT الأربعة ليصبح بحجم OWL، لكان وزنه نصف مليون طن. ومع ذلك، فتحريك 10 000 طن بالدقة المطلوبة هو تَحَدٍّ في حدّ ذاته. وتتضمن الخيارات التي يعكف المهندسون على دراستها حاليا عربات نقل منخفضة تشبه عربات القطار، تَسْتَعْمِلُ إدارات احتكاكيةً(1) وطبقات رقيقة من الزيت يطفو عليها المقرابُ (كما هي الحال في وحدات VLT) وتعويما مغنطيسيا(2).

انتهاك القانون(**)

يترتب على ما سبق أن الفلكيين لم يفقدوا عقولهم عندما فكروا في بناء مقاريب تصل أقطارها إلى 100 متر. وفي حين كانت الزيادات في حجم المقراب تتطلب في الماضي قفزة في الظلام التقاني، فإن الزيادات في المستقبل ستستفيد من المعارف والخبرات الحاليّة.

والسؤال الرئيسيّ الآن هو التكلفة. تاريخيا، كان ثمن صناعة مقراب يتناسب مع قطر مرآته الأساسية مرفوعا إلى القوة 2.6 ($D^{2.6}$). لذا فإذا كانت تكلفة كلٍّ من المقاريب الأربعة VLT التي حجم كل منها ثمانية أمتار قرابة 100 مليون دولار، فإن ثمن المقراب الذي قطره 20 مترا يبلغ نحو بليون دولار - وهذا أكبر مبلغ يأمل أي شخص في جمعه لشراء مقراب جديد. أما تكلفة مقراب قطره 100 متر فمبلغٌ يُحْدِثُ الدُّوار في الرؤوس: إنه 70 بليون دولار. وما دام قانون تكلفة المقاريب هذا ساريا، فيجب على الفلكيين التفكير مليا في بناء نُسَخ متعدّدة لمقراب صغير لبلوغ الحجم المكافئ المنشود، وعندئذ تصبح التكلفة D^2. فببليون دولار يمكن شراء 10 مقاريب قطر كل منها 8.2 متر مساحتها تكافئ مساحة مقراب واحد قطره 26 مترا. ولسوء الحظ، فللأسباب المذكورة آنفا، لا يُعني التكافؤ في الحجم تكافؤا في القدرة. **فلصفيف** array المقاريب العادية حساسيّةُ مقرابٍ قطره 26 مترا؛ لكنّ مَيْزَها هو مَيْزُ مقرابٍ قطره 8.2 متر. ولهذا الصفيف، عندما يُستعمل **كمقياس تداخل** interferometer، مَيْز أعلى، لكنْ حساسيّة أخفض.

ولحسن الحظ، يعتقد المهندسون أن بمقدورهم انتهاك هذا القانون. وسبيلُهم إلى هذا إنتاج المكوّنات بالجملة. وهذا يجعل تكلفة كلٍّ من المكونات تنخفض انخفاضا حادًّا. ويتطلب هذا بدوره مقاربة جديدة للآلات الضوئية. فبدلا من المرآة الأولية العادية التي لها شكل مجسم قطع زائد(3)، والتي توجب أن تكون كل قطعة منها مفصَّلة تبعا لموقعها فيها، يمكن أن يكون لمقراب قطره 100 متر مرآة كروية، لجميع قطعها شكل واحد. لذا يمكِّن خطُّ تجميع واحد من إنتاج جميع القطع التي عددها 3048 بمعدل قطعة كل يومين. لكن المشكلة هي أن الشكل الكروي يُحْدِثُ تشويها للضوء. وبغية تعويض ذلك، لا بد من تزويد المقراب بجهاز يسمى مصحِّحا(4)، يشبه ذاك الذي أصلح رؤية مقراب هَبل. ومع ذلك، يظل هذا النظامُ أرخصَ ثمنا.

وتمثل القبة إحدى النفقات الرئيسية لبناء أي مقراب. فلمقراب پالومار، مثلا، قبة حجمها قريبٌ من حجم قبة كاتدرائية القديس بطرس بروما، ولو أنها إلى حد ما لا تدانيها فنّيا. وأحد أسباب كِبَر قبة پالومار هو أن قاعدة المقراب مائلة بغية توجيهه إلى النجم القطبي. وبهذه الطريقة تتمكّن هذه الآلة من تعقّب النجوم بسهولة، وذلك بمجرد تدوير المقراب حول

(*) Other Proposed Telescopes
(**) Breaking the Law
(1) friction drives، وهي وسائل إدارة تشتغل بواسطة قوى الاحتكاك التي تنشأ عند ضغط عجلة دوّارة ضد عجلة ثانية
(2) magnetic levitation
(3) hyperboloid
(4) corrector

التتمة في الصفحة 53

المقالات

ترجمة أو مراجعة









Majallat AlOloom

المجلد 22 ـ العدد 10
أكتوبر (تشرين الأول) 2006

العلوم

رؤية الطيور للألوان(*)

تتمتع الطيور بنظام لرؤية الألوان يفوق ذلك الموجود في جميع الثدييات بما فيها الإنسان.

<J. H. كولدسميث>



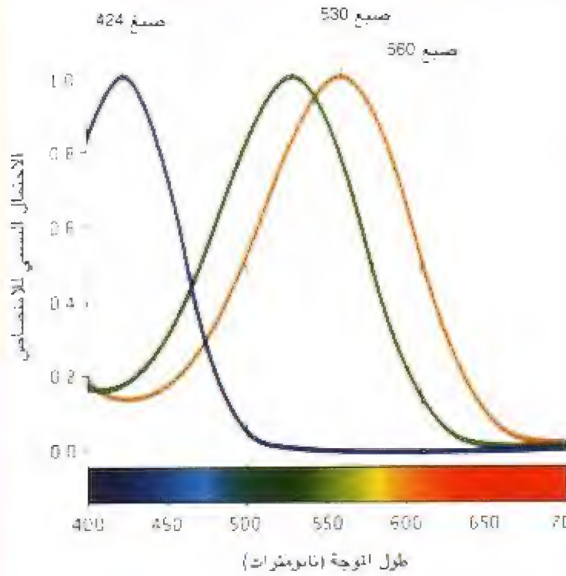
طائر البوقير hornbill الأفريقي الأرضي *Bucorvus leadbeateri* هو كغيره من الطيور، يرى العالم نسيجا غنيا بالألوان لا نكاد نتخيله. وللطيور هذه القدرة لأنها احتفظت بخلايا مخروطية تتعامل مع الألوان في العين فقدتها الثدييات قبل ملايين السنين.

لقد اعتدنا، نحن بني البشر، أن نفترض أن جهاز الرؤية لدينا يتربّع فوق قمة من النجاح التطوري. فهو يمكننا من إدراك الكون في أبعاد ثلاثة، وأن نكشف الأشياء عبر مسافات بعيدة، وأن نتنقل هنا وهناك بأمان. وإننا لنستطيع أن نتعرف بدقة أفرادا آخرين، وأن نكشف عواطفهم من مجرد نظرات خاطفة إلى وجوههم. والحقيقة أننا حيوانات مبصرة نرى صعوبة في تخيل العوالم الحسية لمخلوقات لها قدرات تمتد إلى آفاق أخرى. فالخفاش الصائد في الليل ـ على سبيل المثال ـ يدرك وجود الحشرات الصغيرة بالإنصات لصدى ندائها العالي الحدة.

ومن الطبيعي أن تعتمد معرفتنا برؤية الألوان بشكل أولي

(*) WHAT BIRDS SEE

رؤية الإنسان للألوان(*)



يرى البشر وبعض الرئيسات الأخرى الألوان التي يرونها نتيجة تفاعلات بين ثلاثة طرز من خلايا المخاريط في شبكية العين. ويحتوي كل طراز من المخاريط على صبغ مختلف حساس لمدى محدد من أطوال الموجات الضوئية. والطرز الثلاثة من المخاريط تصل أقصى حساسية لها عند نحو 560 و 530 و 424 نانومترا.

وفي الشكل ينشأ الخطان الرفيعان الرأسيان عند الأطوال الموجية التي تُمتص بالتساوي بالصبغ 560. ومع ذلك فإن الفوتونات من الأشعة التي لها طول موجي 500 نانومتر (*باللون الأزرق المخضر*) لها طاقة أكبر من فوتونات الأشعة التي لها طول موجي 610 نانومترات (*باللون البرتقالي*). يُحدث كلاهما الاستجابة نفسها من الصبغ. ومن ثم يُحدثان الاستثارة نفسها لخلية المخروط. وبناء على ذلك فإن خلية مخروطية واحدة لا تستطيع أن تبين للدماغ طول موجة الضوء الممتص. فلكي يتم تمييز طول موجة من أخرى يتعين على الدماغ مقارنة الإشارات الواردة من مخاريط لها أصباغ بصرية مختلفة.

على ما يراه البشر. ويستطيع الباحثون بسهولة تنفيذ تجارب على عدد من الأفراد المتعاونين لاكتشاف - مثلا - ما إذا كانت مخاليط من الألوان تبدو متماثلة أو مختلفة. ومع أن العلماء توصلوا إلى معلومات مؤيدة من مجموعة متباينة من أنواع أخرى بتسجيل قدْح (تنشيط) firing الخلايا العصبية. فقد ظللنا لا نعلم حتى بداية السبعينات أن العديد من الفقاريات - ومعظمها حيوانات غير ثديية - يرى الألوان من خلال جزء من الطيف لا يراه البشر: وهو المافوْسَجي (فوق البنفسجي)(1) القريب.

نظرة إجمالية/ حكاية تطور(**)

- **تعتمد رؤية الألوان في الفقاريات على خلايا المخاريط في الشبكية. لقد ثبت أن الطيور، وكذا العظايا (السحالي) والسلاحف والعديد من الأسماك، لها أربعة طرز من خلايا المخاريط، في حين أن لمعظم الثدييات طرازين فقط.**
- **كان لأسلاف الثدييات المجموعة الكاملة من المخاريط، ولكن خلال فترة من تطورها حينما كانت ليلية النشاط أساسا - وبذا لم تكن رؤية الألوان حاسمة لبقائها - فقدت الثدييات الباكرة طرازين من خلايا المخاريط.**
- **استعادت أسلاف مجموعة من رئيسات العالم القديم، تشمل الإنسان، طرازا ثالثا من المخاريط عن طريق حدوث طفرة لأحد طرز المخاريط الموجودة.**
- **لكن معظم الثدييات مازال لها طرازان فقط من المخاريط، وهذا يجعل رؤية الثدييات للألوان - حتى بالنسبة إلى الإنسان ومن ينتسبون إليه - محدودة بشكل واضح عند مقارنتها بعالم الرؤية عند الطيور.**

وقد بدأ اكتشاف الرؤية المافوسجية بدراسة الحشرات، وذلك مع حب استطلاع رجل إنكليزي مرموق هو السير «J. لوبوك» (لورد أڤبوري Lord Avebury)، وهو صديق وجار لـ«Ch. داروين» وعضو في البرلمان وماليٌّ ومصرفيٌّ وعالم آثار وعالم في الطبيعيات: لقد اكتشف قبل عام 1882 بقليل أنه في وجود الضوء المافوسجي يقوم النمل بالتقاط العذارى (الخادرات) ويحملها إلى مناطق معتمة أو إلى مناطق تستضيء بضوء ذي موجات أطول؛ ثم مع بداية أواسط القرن العشرين أوضح عالم الطبيعيات النمساوي «K. ڤون فرِش» وطلبته (وطلبة هؤلاء) أن النحل والنمل لا ترى الضوء المافوسجي كلونٍ محددٍ فحسب، بل إن هذه الحشرات تستخدم ضوء السماء المافوسجي كجزء من بوصلة سماوية.

ومعرفة أن حشرات كثيرة جدا تستشعر الضوء المافوسجي قد أدت باختصار إلى فكرة أن هذه المنطقة الطيفية تزود الحشرات بنطاق حسي خاص لا تستطيع مفترساتها من الطيور رؤيته. ولكن لا شيء يمكن أن يكون أبعد عن الحقيقة من ذلك. فالعمل على مدى 35 عاما مضت أوضح أن الطيور والعظايا (السحالي) والسلاحف والعديد من الأسماك لها مستقبلات مافوسجية في شبكيات عيونها. فلماذا - إذًا - تختلف الحال كثيرا في الثدييات؟ ما الذي جعلها تحوز رؤية لونية ضعيفة؟ إن البحث عن إجابات لهذا التساؤل كشف عن قصة تطورية ممتعة، أدت إلى رؤى جديدة للثراء غير العادي في عالم الرؤية عند الطيور.

(*) Human Color Vision

(**) Overview: An Evolutionary Tale

(1) ultraviolet (UV)

ميزة الطيور(*)

عن طريق تحليل الدنا للأنواع المعاصرة، استطاع العلماء أن ينظروا إلى الزمن الذي مضى ويحددوا كيف تغيرت أصباغ المخاريط مع نشأة الفقاريات فأوضحت دراساتهم أن الفقاريات الباكرة جدا كان لها أربعة طرز من المخاريط (*المثلثات الملونة*)، كل منها يحوي صبغا مختلفا. وقد فقدت الثدييات اثنين من هذه المخاريط خلال تطورها المبكر - على الأرجح - بسبب أن هذه الحيوانات كانت ليلية وأن المخاريط لا يُحتاج إليها للرؤية في الضوء الخافت. وعلى النقيض من ذلك، فإن الطيور ومعظم الزواحف احتفظت بأربعة أصباغ مخاريط مختلفة في أطيافها.

وبعد انقراض الدينوصورات بدأت الثدييات بالتنوع، واستعاد الخط التطوري الذي أعطى رئيسات العالم القديم التي تعيش حاليا - مثل قردة إفريقيا والقردة العليا والإنسان - طرازا ثالثا من المخاريط خلال تضاعف تلته طفرة في جينة أحد الأصباغ الباقية. ولما كان البشر نشؤوا عن هذا الخيط التطوري للرئيسات فنحن لا نشبه معظم أقاربنا من الثدييات في كوننا نمتلك ثلاثة طرز من المخاريط (بدلا من اثنين) ورؤية لونية ثلاثية الألوان، وهذا يعتبر تحسنا، ولكنه لا يجاري بأية حال عالم الرؤية الأكثر رفاهة ودقة عند الطيور.



كيف نشأت رؤية الألوان(**)

تُفهم الاكتشافات على أفضل ما يكون إذا أدركنا بداية بعض التفاصيل الأساسية عن كيف يمكن لأي كائن استشعار اللون. أولا، هناك فهم خاطئ شائع يجب التخلي عنه. فكما يتعلم الكثير في المدرسة، صحيح أن الأشياء تمتص بعض الأطوال الموجية من الضوء، وتعكس الباقي منها، وأن اللون الذي نستشعره للأشياء إنما يعتمد على الأطوال الموجية للضوء المنعكس. ولكن اللون ليس في الواقع خاصية للضوء، أو للأشياء التي تعكسه. إنه إحساس ينشأ في الدماغ.

في الفقاريات تبدأ رؤية اللون في الخلايا المخروطية بالشبكية، وهي طبقة الخلايا العصبية التي تنقل إشارات الرؤية إلى الدماغ. ويحتوي كل مخروط على صبغ يتكون من إحدى صور البروتين أُبسين opsin مرتبط بجزيء صغير يعرف باسم **ريتينال** retinal يشبه كثيرا الڤيتامين A. وعندما يمتص الصبغ الضوء (أو بمعنى أدق يمتص حزما منفصلة من الطاقة تعرف باسم **فوتونات** photons)، تغير الطاقة المضافة شكل الريتينال. وتستحث فيضا من الأحداث الجزيئية يؤدي إلى استثارة الخلية المخروطية. وتؤدي هذه الاستثارة بدورها إلى تنشيط الخلايا العصبية للشبكية، حيث تطلق مجموعة منها سيالات عصبية في العصب البصري لتنقل المعلومات عن الضوء الذي استقبلته إلى الدماغ.

وكلما كان الضوء أشد قوة، امتصت الأصباغ البصرية فوتونات أكثر، وزادت استثارة كل مخروط، وظهر الضوء أكثر زَهْوا. ولكن المعلومات التي ينقلها كل مخروط على حدة محدودة، فالخلية بذاتها لا تستطيع إخبار الدماغ أي طول موجة ضوئية هو السبب في استثارتها. وهناك بعض أطوال موجات ضوئية تُمتص على نحو أفضل من غيرها، ويتميز كل صبغ بصري بطيف يوضح كيف يختلف الامتصاص باختلاف طول الموجة. وقد يقوم صبغ بصري بامتصاص طولين موجيين بقدر متساو، ولكن مع أن لفوتونات كل منهما قدرا مختلفا من الطاقة فإن المخروط لا يمكن أن ينبئ عن كل منهما بشكل منفرد، حيث إن كلا منهما يغير شكل الريتينال، وبذا

(*) The Avian Advantage

(**) How Color Vision Evolved

في الحقيقة، اللون ليس خاصية للضوء أو للأجسام التي تعكس الضوء، إنه إحساس ينشأ داخل الدماغ.



فلامنكو

فإنهما يستحثان نفس الفيض الجزيئي المؤدي إلى حدوث الاستثارة. وكل ما يستطيع المخروط فعله هو أن يَعُدّ الفوتونات التي قام بامتصاصها، ولكنه لا يستطيع أن يميز طول موجة معينا من طول موجة أخرى. ومن ثم فإن المخروط يمكن أن يُستثار بضوء قوي عند طول موجة يُمتص بقدر ضئيل نسبيا، بنفس قدر استثارته بضوء خافت عند طول موجي يسهل امتصاصه.

والنتيجة المهمة التي يمكن التوصل إليها هنا هي أنه لكي يرى الدماغ الألوان عليه أن يقارن استجابات طرازين أو أكثر من المخاريط المحتوية على أصباغ بصرية متباينة؛ بل إن وجود أكثر من طرازين من المخاريط في الشبكية يسمح حتى بقدرة أعظم على رؤية ألوان مختلفة.

وقد أتاحت الأُبسينات* التي تميز مخروطا من آخر طريقة لدراسة تطور رؤية الألوان. ويستطيع الباحثون استنباط العلاقات التطورية للأُبسينات في الطرز المختلفة من المخاريط والمنتمية إلى أنواع مختلفة من الحيوانات، وذلك بفحص تتابع **قواعد النكليوتيدات** nucleotide bases (أو **حروف الدنا** DNA letters) في الجينات التي تُكوِّد لهذه البروتينات. وقد أوضحت أشجار النسب التطورية evolutionary trees الناتجة أن الأُبسينات بروتينات قديمة وُجدت قبل ظهور المجموعات الحيوانية السائدة التي تعمر الأرض هذه الأيام. ويمكننا تتبع أربعة مسارات لأصباغ مخاريط الفقاريات تُسمى من الناحية الوصفية بحسب المنطقة الطيفية التي تكون فيها أكثر حساسية: طول موجي طويل، طول موجي متوسط، طول موجي قصير، المافوسجي. وفي شبكية جميع المجموعات الرئيسية للفقاريات أعمدة، كما أن لها مخاريط. وتمكّن الأعمدة ـ التي تحتوي على الصبغ البصري **رودوبسن** rhodopsin من الرؤية في الضوء الخافت جدا. ويماثل الرودوبسن في كل من تركيبه وخصائصه الامتصاصية أصباغ المخاريط الأكثر حساسية للأطوال الموجية التي تقع عند منتصف طيف الرؤية، وهي كانت قد نشأت عن تلك الأصباغ قبل مئات ملايين السنين.

وللطيور أربعة أصباغ مخاريط تتميز أطياف بعضها من بعض، نشأ كل واحد منها عن أحد المسارات التطورية الأربعة. أما الثدييات فلها نموذجيا طرازان فقط من أصباغ المخاريط، أحدهما حساس للغاية للبنفسجي، والآخر حساس عند الأطوال الموجية الطويلة. والتفسير الأرجح لهذه القلة هو أنه خلال تطورها المبكر في حقب الحياة الوسطى (245 مليون إلى 65 مليون سنة مضت) كانت الثدييات صغيرة الحجم وتعيش في الخفاء وليلية النشاط. ولما كانت عيونها نشأت لتستفيد من الليل فقد أصبحت معتمدة بشكل متزايد على الحساسية العالية للأعمدة وأقل اعتمادا على رؤية الألوان. ومن ثم فقدت صبغين من أصباغ المخاريط الأربعة التي كانت أسلافها تمتلكها في وقت ما، وهي الأصباغ التي بقيت في معظم الزواحف والطيور.

إن انحسار الدينوصورات قبل 65 مليون سنة أعطى الثدييات فرصا جديدة للتخصص فبدأت بالتنوع، واتخذت إحدى المجموعات ـ وتشتمل على أسلاف البشر ورئيسات العالم القديم الأخرى ـ حياة نهارية وانتشرت ما بين الأشجار وجعلت من الفواكه جزءا مهما من وجباتها. وكانت ألوان الزهور والفواكه غالبا مغايرة للأوراق النباتية الخضراء المحيطة بها، ولكن الثدييات ـ التي كان لها صبغ مخاريط واحد فقط حساس لأطوال الموجات الطويلة ـ لم تكن قادرة على رؤية التباين بين الألوان في مناطق الطيف الخضراء والصفراء والحمراء. وكان الحل أمام هذه الرئيسات موجودا في صندوق عُدة الوسائل التطورية.

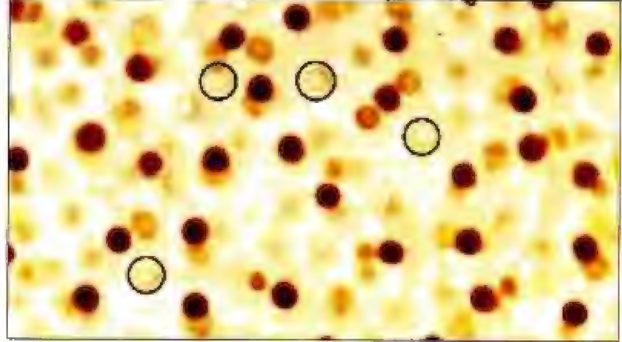
في الانقسامات الخلوية الخاصة بإنتاج البويضات **والنطاف** sperms قد يحدث مصادفة تبادل غير متساو لأجزاء من الصبغيات (الكروموسومات) يؤدي إلى إنتاج مشيج (جاميطة) به صبغي يحوي نسخة واحدة زائدة من جينة واحدة أو أكثر. فإذا حافظت الأجيال التالية على هذه الجينات الزائدة فإن الانتقاء (الانتخاب) الطبيعي قد يحفظ الطفرات النافعة التي تنشأ فيها. وكما أوضح <J. ناثان> و<D. هوكنس> [اللذان يعملان في جامعة ستانفورد]، فإن شيئا من ذلك حدث، خلال الـ40 مليون سنة الأخيرة، في نظام الرؤية عند أجدادنا رئيسات العالم القديم. إن التبادل غير المتساوي للدنا في خلية تناسلية، ثم حدوث طفرة للنسخة الزائدة من جينة لصبغ حساس لأطوال الموجات الطويلة، قد نتج منهما خلق صبغ ثان حساس لأطوال الموجات الطويلة، وهذا مثل نقلة في الطول الموجي لحساسيته القصوى. وعلى ذلك يختلف هذا المسار للرئيسات عن الثدييات الأخرى في حيازته ثلاثة أصباغ للمخاريط بدلا من اثنين ورؤية للألوان ثلاثية.

ومع كونه تحسنا جوهريا، لم يزودنا هذا النظام بالنظام الأمثل لرؤية الألوان. فمازال نظامنا هو ناتج عملية استرداد تطورية، ويظل

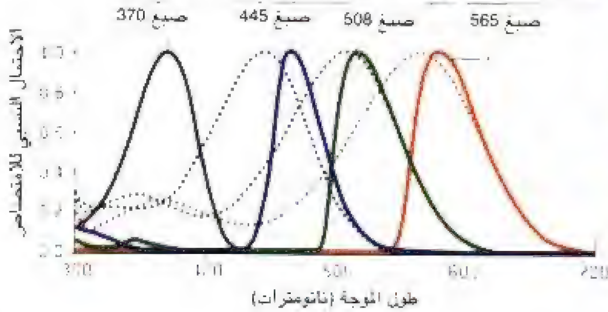
(*) ج: أُبسين opsin

أهمية قطيرات زيت المخاريط(*)

احتفظت المخاريط في الطيور والعديد من الفقاريات الأخرى ببضع خصائص فُقدت من مخاريط الثدييات. وأهم هذه الخصائص بالنسبة إلى رؤية الألوان هو قطيرات الزيت. فمخاريط الطيور تحوي قطيرات حمراء وصفراء، وأخرى عديمة اللون تقريبا وشفافة. والصورة المجهرية لشبكية القرقف الأمريكي (في اليمين) تكشف بوضوح القطيرات الصفراء والحمراء. وتحدد الحلقات السوداء عددا من القطيرات العديمة اللون. وجميع القطيرات، فيما عدا تلك الشفافة حقا، تعمل كمرشحات تزيل الضوء ذا الأطوال الموجية القصيرة. ويعمل تأثير الترشيح على تضييق الحساسية الطيفية لثلاثة من المخاريط الأربعة للطيور وينقلها إلى أطوال موجية أطول (*الرسم البياني*). وعن طريق الحد من أطوال الموجات التي تستجيب لها المخاريط تمكّن القطيرات الطيور من تمييز ألوان أكثر مما لو كانت تراه بوضوح من دون القطيرات. ويقوم الأوزون في طبقات الجو العليا بامتصاص الأطوال الموجية الأقصر من 300 نانومتر، وبهذا فإن الرؤية المافوسجية للطيور تشمل المافوسجي القريب فقط في منطقة طول موجي بين 300 و 400 نانومتر.



التأثير الترشيحي للقطيرات



قاصرا بمقدار صبغ واحد عن **نظام الرؤية الرباعي الألوان** tetrachromatic visual system الموجود في الطيور والعديد من الزواحف والأسماك. ويعيق تراثنا الجيني أيضا البعض منا على نحو آخر، وذلك إن كلتا جينتينا المختصتين بالأصباغ الحساسة لأطوال الموجات الطويلة تقع على الصبغي X. ولما كان لدى الذكور صبغي X واحد فإن حدوث طفرات في أي من جينتي الأصباغ يجعل للذكر المصاب قدرة محدودة على التمييز بين الألوان الحمراء وتلك الخضراء. والإناث اللاتي يعانين هذا الطراز من عمى الألوان أقل شيوعا، ذلك أنه إذا تعطلت جينة للصبغ تقع على نسخة واحدة من الصبغي X فإنهن يظللن يستطعن بناء الصبغ الواقع تحت سيطرة الجينة السليمة على نسختهن الأخرى من الصبغي X.

وليست أصباغ المخاريط هي العناصر الوحيدة التي فُقدت من الشبكية خلال التطور المبكر للثدييات. إن كل مخروط في طائر أو زاحف يحتوي على قُطيرة زيت ملونة، ولم تعد هذه القطيرات موجودة في مخاريط الثدييات. وهذه القطيرات ـ التي تحوي تركيزات عالية من جزيئات تعرف باسم **كاروتينويدات** carotenoids ـ تقع بحيث يمر الضوء خلالها قبل وصوله إلى رصّة الأغشية في الجزء الخارجي من المخروط، حيث يوجد الصبغ البصري. وتعمل قطيرات الزيت كمرشحات تزيل أطوال الموجات القصيرة وتضيق من أطياف امتصاص الأصباغ البصرية. وهذا يقلل من تراكب أطياف الأصباغ بعضها فوق بعض ويزيد من عدد الألوان التي يستطيع الطائر ـ من ناحية المبدأ ـ أن يدركها.

اختبار رؤية الألوان عند الطيور(**)

إن وجود أربعة طرز من المخاريط التي تحتوي على «أصباغ بصرية» مختلفة يعني بالتأكيد أن للطيور قدرة على رؤية الألوان. إلا أن الإيضاح المباشر للقدرة على رؤية الألوان يحتاج إلى تجارب سلوكية تظهر الطيور بها أنها تستطيع تمييز الأشياء الملونة. وهذه التجارب يجب أيضا أن تستبعد العناصر الدالة الأخرى ـ مثل شدة الاستضاءة ـ التي قد تستخدمها الطيور. وعلى الرغم من قيام الباحثين بتطبيق تجارب من هذا الطراز على الطيور، فإنهم لم يبدؤوا باختبار دور المخاريط المافوسجية إلا في العقدين الماضيين. وقد عزمت وطالبي السابق <K. B.> بتلر على استخدام تقنية المضاهاة اللونية للكشف عن الكيفية التي تسهم بها المخاريط الأربعة عند الرؤية.

ولفهم كيف تعمل «المضاهاة اللونية»، ضَعْ في الاعتبار أولا رؤية الألوان الخاصة بنا. إن الضوء الأصفر يستثير طرازي مخاريط أطوال الموجات الطويلة في الإنسان. وإضافة إلى ذلك، بالإمكان أن نجد خليطا من الضوءين الأحمر والأخضر يستثير طرازي المخاريط نفسيهما بالقدر نفسه تماما. وسيدركه الشخص الناظر تماما كما يرى اللون الأصفر عند استخدام الضوء الأصفر النقي. وبكلمات أخرى، إن ضوءين مختلفين فيزيائيا قد يتضاهيان في اللون ـ وهذا يذكرنا بأن استشعار الضوء يحدث في الدماغ. إن أدمغتنا تستطيع تمييز الألوان في هذه المنطقة من الطيف بمقارنة نواتج المخروطين

(*) The Importance of Cone Oil Droplets
(**) Testing Color Vision in Birds

حتى السبعينات لم يدرك العلماء أن الكثير من الحيوانات ترى الألوان في جزء الطيف المافوسجي القريب.



ماكاو

الخاصين بأطوال الموجات الطويلة

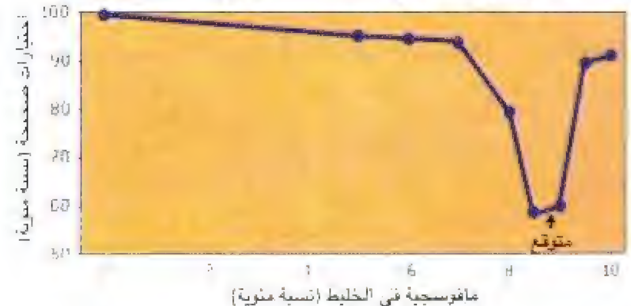
وبالاستعانة بمعرفة الخواص الطبيعية للمخاريط الأربعة وقطيرات الزيت استطعتُ و«بتلر» حساب مقدار خليط الأطوال الموجية الحمراء والخضراء الذي يعطي للطائر المظهر اللوني نفسه الناتج من طول الموجة الصفراء. ولما كانت الأصباغ البصرية للبشر والطيور غير متماثلة فإن هذا الخليط يختلف عن ذلك الذي نتوقعه من البشر فيما لو طلبنا إليهم المضاهاة اللونية نفسها. وإذا ما استجابت الطيور للضوء كما نتوقع نحن فإن هذه النتيجة ستؤكد قياساتنا عن الأصباغ البصرية وقطيرات الزيت وستتيح لنا الانطلاق نحو استكشاف ما إذا كانت المخاريط الحساسة للضوء المافوسجي تؤدي دورا في رؤية الألوان، وكيفية ذلك.

وقد تم تطبيق التجارب على ببغاوات أسترالية صغيرة تعرف باسم «الدرة» budgerigers (*Melopsittacus undulatus*) دربنا الطيور على الربط بين جائزة من الطعام والضوء الأصفر. وكان الطائر يجثم في موقع يرى منه مصدرين للإضاءة على بعد نحو ثلاث أقدام. أولهما كان ضوء التدريب الأصفر والآخر خليطا متنوعا من الأحمر والأخضر. وخلال الاختبار كان الطائر يطير إلى الضوء حيث توقّع طعاما. فإذا ما ذهب إلى الضوء الأصفر ينفتح قمع صغير للبذور برهة حيث يحصل الطائر على وجبة سريعة. أما إذا ذهب الطائر إلى اللون الخطأ فإنه لم يكن يحصل على جائزة. وقد قمنا بتغيير الخليط الأحمر والأخضر في تتابع غير منتظم، كما غيرنا موقعي الضوءين حتى لا تستطيع الطيور الربط بين الطعام والجانب الأيمن أو الجانب الأيسر. وقد قمنا أيضا بتغيير شدة ضوء التدريب بحيث لا تستطيع الطيور توظيف شدة الإضاءة دليلا لها.

وعند استخدام معظم مخاليط الأحمر والأخضر كانت الطيور قادرة بيسر على اختيار ضوء التدريب الأصفر والحصول على جوائزها من الحبوب. ولكن عندما احتوى الخليط على نحو 90 في المئة من اللون الأحمر و10 في المئة من اللون الأخضر - وهي النسبة التي إذا حسبناها وجدناها تضاهي اللون الأصفر لضوء التدريب - أصبحت الطيور مشوشة واختياراتها غير صائبة.

وبإعادة التأكد من أننا نستطيع التنبؤ متى سوف ترى الطيور تَضاهي الألوان، بحثنا عن دلائل مماثلة لإظهار أن مخاريط الأشعة المافوسجية تسهم في الرؤية الرباعية الألوان للضوء. وفي هذه التجربة قمنا بتدريب الطيور على استقبال الطعام مع ضوء بنفسجي واستكشفنا قدرتها على تمييز طول الموجة هذا من خليط من طول الموجة الأزرق وشريط عريض من أطوال موجية قرب المافوسجية. وقد وجدنا أن الطيور تستطيع بوضوح تمييز الضوء البنفسجي من معظم المخاليط، بيد أن اختياراتها خضعت للمصادفة عند نسبة 92 في المئة أزرق و8 في المئة مافوسجيا، وهي النسب التي قمنا بحساب أنها تجعل لون الخليط لا يمكن تمييزه من ضوء التدريب البنفسجي. وهذه النتيجة تعني أن الأطوال الموجية للمافوسجية تُرى كألوان محددة بوساطة الطيور وأن مخاريط مافوسجية تسهم في نظام رؤية رباعي الألوان.

الدليل على الرؤية المافوسجية عند الطيور



هل الطيور ترى، حقيقة، الأطوال الموجية المافوسجية؟ لقد أوضح المؤلف وزملاؤه في تجربة أنها فعلا تراها. فقد قام الباحثون بتدريب طيور الدرة الأسترالية parakeets على تمييز ضوء التدريب البنفسجي من الضوء المكوَّن من مخاليط من الأزرق والمافوسجي. أما عندما يكون الخليط مكونا من 8٪ فقط من المافوسجي فإنه يضاهي لون ضوء التدريب وترتكب الطيور أخطاء عديدة. وتهبط اختياراتها إلى محض المصادفة عند النقطة (السهم) التي حسب عندها المؤلف أن الألوان ستتضاهى على أساس قياسات الأصباغ البصرية وقطيرات الزيت في مخاريط الطيور.

فيما وراء الإدراك البشري[*]

وقد قدمت تجاربنا الدليل على أن الطيور تستخدم الطرز الأربعة من المخاريط جميعا في رؤيتها للألوان. ولكنه من الصعب - بل هو في الحقيقة من المستحيل - على الإنسان معرفة كيف يكون في الواقع إدراكها الحسي بالألوان. فهي لا ترى المافوسجي القريب فقط، بل إنها تستطيع أيضا رؤية ألوان لا نستطيع نحن حتى تخيلها. وللتشبيه - يمكننا القول إن رؤيتنا للألوان على أساس **ثلاثي الألوان** trichromatic يمكن تمثيلها بمثلث، في حين أن رؤيتها

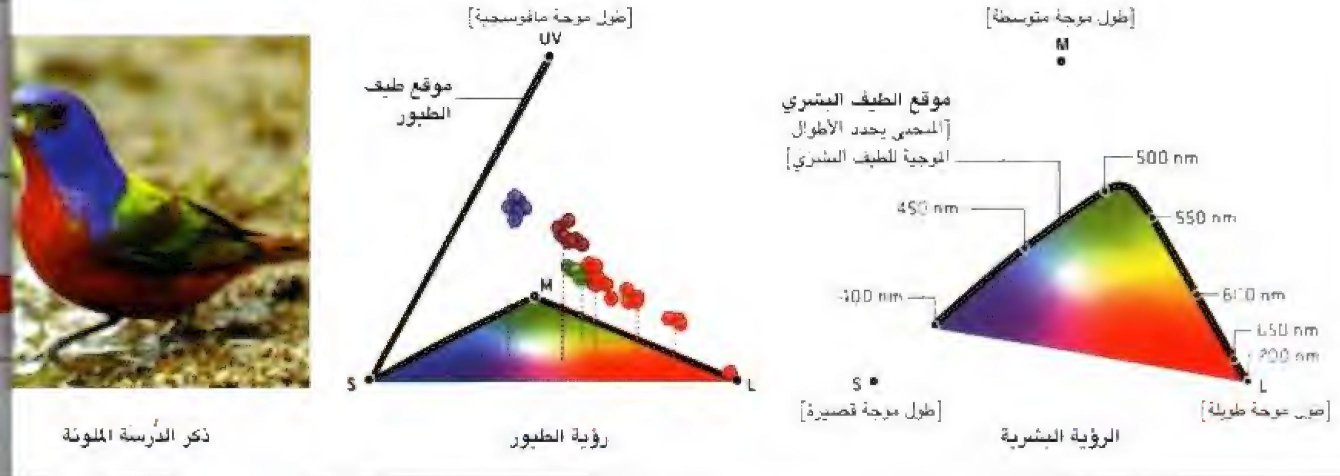
(*) Beyond Human Perception

نظرة واقعية مختلسة إلى عالم الرؤية للطيور(*)

يمكن رسم رؤية الألوان لدى البشر على شكل مثلث. إن جميع ألوان الطيف التي نستطيع نحن البشر أن نراها مُوَقَّعة على امتداد المنحنى الأسود الثقيل في داخل المثلث. وجميع الألوان العديدة الأخرى التي تكوَّن بخليط من الأضواء تقع أسفل هذا المنحنى.

ولكي نرسم خريطة لرؤية الألوان في طائر نحتاج إلى إضافة بُعد آخر. والنتيجة تكون شكلا مجسما، رباعي الأوجه. إن جميع الألوان التي لا تنشّط مستقبلات مافوسجية تقع في قاع رباعي الأوجه. إلا أنه بسبب أن قطيرات الزيت للمخروط تزيد من عدد الألوان التي يستطيع أن يراها الطائر [كما هو موضح في الإطار في الصفح 16]، فإن موقع الطيف سيتبع حافات القاع المثلث وليس شكل زعنفة سمكة القرش لمثلث الرؤية البشري. وتقع الألوان التي تتوافق مع مستقبلات مافوسجية في الحي فوق ذلك القاع. وعلى سبيل المثال يعكس الريش الأحمر والأخضر والأزرق لط الدُّرسة bunting الملونة (الصورة) كميات متنوعة من الضوء المافوسجي، إضافة الألوان التي نراها نحن البشر (الرسم البياني).

ولتوضيح الألوان التي تراها أنثى طائر الدرسة بيانيا عندما تنظر إلى شريكها ع



الرؤية البشرية

رؤية الطيور

ذكر الدُّرسة الملونة

للألوان على أساس رباعي التلوين تتطلب بعدا إضافيا ليعطي شكلا **رباعي الأوجه** tetrahedron أو **هرما مثلثيا** triangular pyramid. إن الحيز الواقع فوق أرضية الشكل الرباعي الأوجه يحتوي تنوعا من الألوان يقع أبعد من حدود الخبرة البشرية المباشرة.

كيف تستفيد الطيور من هذه الثروة من المعرفة بالألوان؟ في كثير من أنواع الطيور نجد الذكور أزهى ألوانا من الإناث. وبعد اكتشاف حساسيتها للضوء المافوسجي قام الباحثون بالبحث عن أدلة تشير إلى أن الألوان المافوسجية غير المرئية للإنسان قد تؤثر في اختيارات الزوج.

وفي أحد اتجاهات الأبحاث قام <M. إيتون> [وكان حينذاك في جامعة منيسوتا] بدراسة 193 نوعا من الطيور التي يبدو فيها الشقان الجنسيان متماثلين بالنسبة إلى الإنسان الفاحص، واعتمادا على قياسات أطوال موجات الضوء المنعكسة من الريش استنتج أن عين الطائر فيما يزيد على 90% من هذه الأنواع ترى فروقا بين الذكور والإناث لم يكن علماء الطيور قد تعرفوها من قبل.

وفي دراسة على ذكور 108 أنواع من الطيور الأسترالية قام بها <F. هوسمان> ومجموعة دولية من الزملاء، وجدوا أن الألوان ذات المكوِّن المافوسجي تزيد زيادة ذات دلالة إحصائية في الريش الذي يؤدي دورا في عروض الغزل، عما هي في الريش من أجزاء أخرى من الطائر. إضافة إلى ذلك، قامت مجموعات من الباحثين من إنكلترا والسويد وفرنسا بدراسة **القُرْقُف الأزرق** blue tit (Parus caeruleus)، وهو طائر أسيوي أوروبي من أقارب **قراقف** chickadees أمريكا الشمالية، **وطائر الزرزور** starling (Sturnus vulgaris). وأشارت النتائج إلى أن الإناث تنجذب في الواقع إلى الذكور التي ينعكس عنها ضوء مافوسجي زاهٍ بقدر أكبر. ولكن ما أهمية ذلك؟ إن انعكاس الضوء المافوسجي من ريش الطيور يعتمد على التركيب تحت المجهري للريش. وبذا يمكن استخدامه كدليل مفيد على صحة ذكور الطيور. وقد أوضح <A. كيسر> و<G. هِل> [من جامعة جورجيا، وجامعة أوبورن] أن ذكور الطيور **الضخمة المنقار الزرقاء** blue grosbeaks (Guiraca caerulea) التي لها الريش الأزهى والتي يميل لونها الأزرق إلى المافوسجي بدرجة أكبر، تكون أكبر حجما وتسيطر على الأراضي المحتوية على أكبر قدر من القرانس وتطعم نسلها عدد مرات أكثر مما تفعل الذكور الأخرى.

وعلى نحو أعم، إن امتلاك مستقبلات للأشعة المافوسجية يزود الحيوان بميزة في البحث عن الغذاء. وقد أوضح <D. بوركارت> [من جامعة ريجنزبورگ في ألمانيا] أن السطح الشمعي لكثير من الفواكه والثمار يعكس ضوءا مافوسجيا ربما يعلن عن وجودها. وقد وجد <J. فايتالا> [من جامعة جيفاسكيلا في فنلندا] وزملاء له

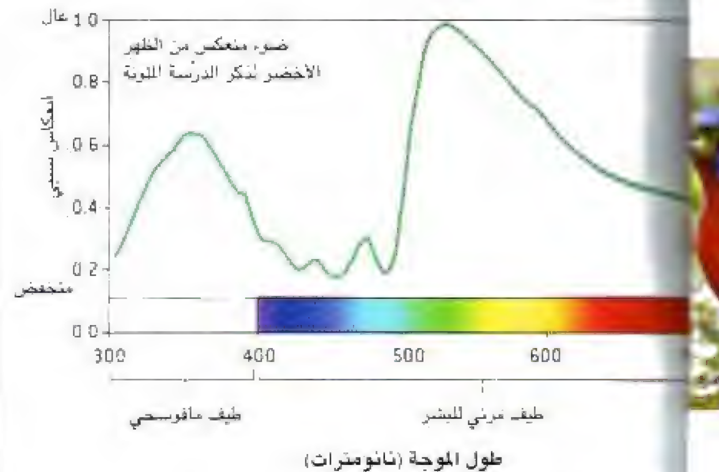
(*) A Virtual Peek Into The Visual World of Birds

أن صقورا صغيرة تعرف باسم **العواسق** kestrels قادرة على تحديد مواقع آثار قوارض الحقول عن طريق الإبصار. فهذه القوارض الصغيرة تطرح مواد ذات رائحة في بولها وبرازها ذُكر أنها تعكس ضوءا مافوسجيا يجعلها ظاهرة للعيان لمستقبلات المافوسجي في صقور العواسق وبخاصة في الربيع قبل أن تغطي النباتات دالآت الرائحة.

وكثيرا ما سألني غير المعنيين بهذه النتائج المثيرة للاهتمام: ما فائدة الرؤية المافوسجية للطيور؟ ويبدو أن السؤال يعني أن الحساسية للمافوسجية يجب أن تكون مسألة خصوصية أو حتى مجرد صفة يجب على الطيور أن تحترم نفسها أن تكون قادرة على أن تعيش سعيدة من دونها. إننا منغلقون داخل عالم من حواسنا إلى حد كبير: فعلى الرغم من إدراكنا معنى فقْد الرؤية ونخشاه، فإننا لا نستطيع أن نستحضر في أذهاننا صورة عالم مرئي أبعد من عالمنا. إنه مما يدعونا إلى التواضع أن نكشف أن الإتقان التطوري ما هو إلا سراب وأن العالم ليس تماما هو ما نتخيله نحن عندما نعايره من خلال عدسة اهتمامات الإنسان بذاته. ■

(*) Imagining a UV World

... من المثلث المسطح إلى الحيز الثلاثي الأبعاد لرباعي الأوجه
... الألوان المنعكسة عن مناطق صغيرة من الريش تمثل بتجمعات من نقاط
... زاء للصدر والزور (الرقبة) أحمر أدكن للعجز، أخضر للظهر، أزرق للرأس
... لا نستطيع استشعار هذه الألوان التي يراها الطائر، لأنه ليس هناك من
... البشر من يستطيع استشعار هذه الألوان). وكلما كان اللون مافوسجيا أكثر
... النقاط أعلى فوق القعر. وهناك توزيع للنقاط داخل كل من هذه التجمعات، حيث
... أطوال الموجية للضوء المنعكس تختلف داخل المناطق، مثل ما نراه نحن البشر
... حمراء للصدر والزور



المؤلف

Timothy H. Goldsmith

*أستاذ فخري في البيولوجيا الجزيئية والخلوية والتكوينية في جامعة ييل، وزميل في الأكاديمية الأمريكية للفنون والعلوم American Academy of Arts and Sciences. وكان قد درس الإبصار في القشريات والحشرات والطيور على مدى خمسة عقود. وقد رعى الاهتمام بدراسة تطور كل من الإدراك المعرفي والسلوك عند الإنسان، وكان مغرما بالتفكير والكتابة مع علماء القانون، وذلك عن طريق صلته **بمعهد كروتر لأبحاث القانون والسلوك** Cruter Institute for Law and Behavioral Research. وقد قام <جولدسميث> قبل اثنتي عشرة سنة من اعتزاله بتدريس مقرر في العلوم الإنسانية والاجتماعية، وألّف بالاشتراك مع <W. زيمرمان> كتابا بعنوان: «**البيولوجيا والتطور والطبيعة البشرية**» Biology, Evolution and Human Nature*

مراجع للاستزادة

The Visual Ecology of Avian Photoreceptors. N. S. Hart in *Progress in Retinal and Eye Research,* Vol. 20, No. 5, pages 675–703; September 2001.

Ultraviolet Signals in Birds Are Special. Franziska Hausmann, Kathryn E. Arnold, N. Justin Marshall and Ian P. F. Owens in *Proceedings of the Royal Society B,* Vol. 270, No. 1510, pages 61–67; January 7, 2003.

Color Vision of the Budgerigar (Melopsittacus undulatus): Hue Matches, Tetrachromacy, and Intensity Discrimination. Timothy H. Goldsmith and Byron K. Butler in *Journal of Comparative Physiology A,* Vol. 191, No. 10, pages 933–951, October 2005.

Scientific American, July 2006

تَخيُّلُ عالَم مافوسجي(*)

مع أنه لا يعلم أحد كيف يبدو العالم للطيور فإن الصور لأزهار **السوزانات السوداء الأعين** black-eyed Susans تقدم لمحة عن كيف يمكن أن تغير القدرة على رؤية ضوء مافوسجي من الصورة التي يبدو عليها العالم. وبالنسبة إلينا فإن مركز الزهرة عبارة عن قرص قاتم صغير (*في اليسار*). ولكن كاميرة مجهزة للكشف عن الضوء المافوسجي فقط «ترى» أنماطا غير مرئية لنا، ويشمل ذلك حلقة دكناء أكبر (*في اليمين*). وقد أعد هذه الصور <A. D هاري>، أستاذ التصوير وتقانة التصوير الفوتوكرافي في معهد روشستر للتقانة Rochester Institute of Technology.

المحررون





جينومات للجميع[1]

*يمكن للجيل التالي من التقانات، الذي سيجعل قراءة **الدنا** DNA سريعة ورخيصة وسهلة المنال، أن ينقلنا، في أقل من عشر سنوات، إلى عصر الطب الملائم لكل شخص.*

<ج. M. تشرش>



عندما انطلقت في عام 1993 **الوب (الشبكة العالمية الانتشار)** web، راجت وانتشرت بين ليلة وضحاها. خلافا لمعظم التقانات الجديدة التي تحتاج نمطيا إلى عشر سنوات على الأقل كي تنتقل من إثبات الفكرة إلى القبول الواسع. ولكن الشبكة لم تظهر حقيقة في غضون عام واحد: فقد اعتمدت على البنية التحتية بما في ذلك بناء الإنترنت ما بين عامي 1965 و 1993. كما اعتمدت على الإدراك المفاجئ بأن وسائل معينة، كالحواسيب الشخصية، قد تجاوزت العتبة الحرجة.

كما أن قوى التبصر والسوق تحث على تنامي التقانات الجديدة وانتشارها. فمثلا، بدأ برنامج الفضاء[1] برؤية حكومية، وبعد انقضاء زمن طويل نسبيا، دفعت الاستعمالات العسكرية والمدنية للسواتل إلى قابلية التسويق التجاري. وإذا ما تطلع أحدنا إلى الثورة التقانية التالية، التي يمكن أن تتمثل بالتقانة الحيوية، فسيمكنه تصور كيف ستشكل الأسواق والرؤى والاكتشافات والاختراعات مخرجاتها، وكذلك تصور العتبات الحرجة في البنية التحتية والوسائل التي ستجعل ذلك ممكنا.

(1) GENOMES FOR ALL

(1) الاقمار الصنعية


Fig. 107.
Fig. 70.

لقد كنت في عامي 1984 و 1985 واحدا بين دزينة تقريبا من باحثين، اقترحوا **مشروع الجينوم (المجين) البشري** Human Genome Project (HGP)، كي نتمكن، لأول مرة، من قراءة كامل كتاب التعليمات من أجل تكوين إنسان والإبقاء عليه والمتضمنة داخل **دنانا** our DNA. وكان هدف المشروع إنتاج تسلسل كامل لجينوم بشري بتكلفة ثلاثة بلايين دولار أمريكي وذلك ما بين عامي 1990 و 2005.

لقد نجحنا في إنهاء القسم الأكثر سهولة، البالغ 93 في المئة، قبل الموعد المحدد ببضع سنوات، وفي توريث كم كبير من تقانات ومن طرائق مفيدة. وخفض التحسين المتنامي لهذه التقانات ولهذه الطرائق سعر السوق لسلسلة جينوم بشري، سلسلة دقيقة بما يكفي كي تكون مفيدة، إلى تكلفتها الحالية البالغة 20 مليون دولار. ومع ذلك، فإن هذا المعدل يعني أن السلسلة الجينية الواسعة النطاق لاتزال بصورة رئيسية مقتصرة على المراكز المخصصة للسلسلة وحكرا على مشاريع الأبحاث المكلفة.

لقد غدا «جينوم الألف دولار» تجسيدا لوعد مثلته المقدرة على سلسلة الدنا: سلسلة أصبحت تكلفتها قابلة للتحمل لدرجة أن بوسع الأفراد أن ينظروا إلى فكرة الإنفاق مرة واحدة في العمر للحصول على كامل تسلسل الجينوم الشخصي لكل منهم بحيث يقرأ الطبيب هذا التسلسل على قرص يقارنه بتسلسل مرجعي، على أنها فكرة تستحق هذا الإنفاق. كما أن تقانة السلسلة الرخيصة ستجعل المعلومات الجينية ذات معنى أعمق، وذلك بمضاعفة عدد الباحثين القادرين على دراسة الجينومات، وعدد الجينومات التي يستطيعون مقارنة بعضها ببعض كي يستنتجوا الاختلافات بين الأفراد في كل من المرض والصحة.

وتتخطى **جينوميات** genomics الإنسان البشر إلى بيئة مليئة **بالمُمرِضات والمستأرجات** allergens والميكروبات (الأحياء الدقيقة) النافعة والموجودة في طعامنا وفي أجسامنا. ويُعنى كثير من الناس بخرائط مناخية، ولعلنا سنفيد في وقت ما من خرائط يومية للممرضات والمستأرجات. كما أن المجالات المتسارعة في نموها للتقانة النانوية، والتقانة الحيوية

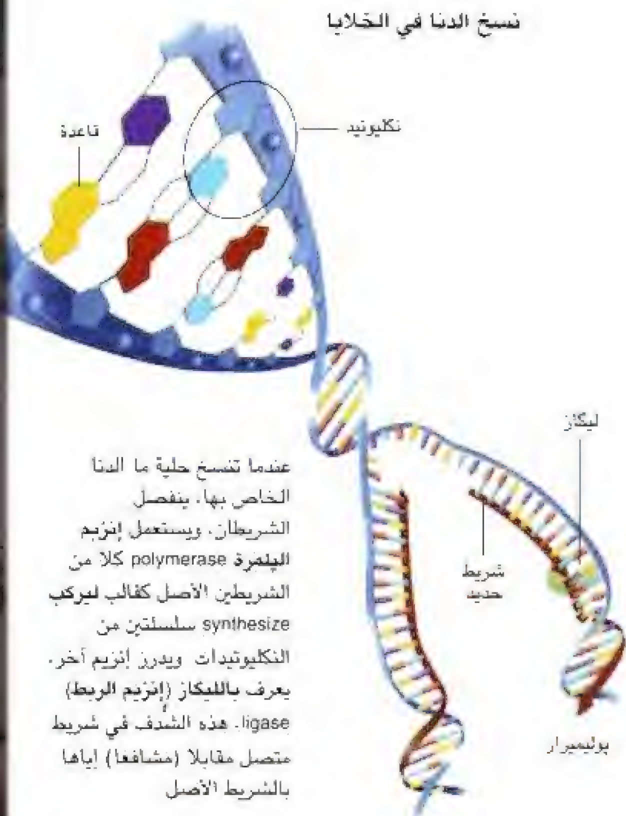
نظرة إجمالية/ ثورات الدنا(*)

- يمكن للكمون الكلي full potential للتقانة أن يتحقق فقط عندما تكون أدواته، كتقانة قراءة الجينوم، رخيصة وسهلة المنال كالحواسيب الشخصية حاليا.
- تخفض المقاربات الجديدة لقراءة الدنا التكاليف باختصار الخطوات التحضيرية، ونمنمة miniaturizing التجهيزات، وسلسلة ملايين الجزيئات سلسلة متزامنة.
- وسيطرح تحقيق الهدف المتمثل بسلسلة منخفضة التكلفة أسئلة جديدة حول الكيفية الأفضل لاستخدام المعلومات الجينية الشخصية الوافرة، وحول الجهة المخولة بهذا الاستخدام. ويُعد مشروع الجينوم الشخصي محاولة للبدء باستكشاف هذه القضايا.

قراءة الدنا(**)

إن كثيرا من تقانات حل (فك) كود الجينومات، يفيد من مبدأ التتامية في تر... (تشافع) قواعد الدنا. وتحوي ألفباء الجينوم أربعة أحرف فقط: تشكل وحدا... جوهرية تسمى القواعد، وهي: الأدنين [A] والسيتوزين [C] والگوانين [G] والتايمين [T]. يترابط بعضها مع بعض [A مع T، وG مع C]، لتشكل درجا... السلم الكلاسيكي للدنا. إن الرسالة المكوَّدة في تسلسل القواعد على طول شريط(1) الدنا مكتوبة فعليا مرتين: ذلك أن تعرف هوية قاعدة في أحد الشريطين يكشف عن متممة القاعدة في الشريط الآخر. وتستعمل الخلايا الحية هذا المبدأ لتنسخ وتصلح جزيئات الدنا الخاصة بها [في الأسفل]، كما يمكن استثمارها لنسخ (1 و 2) ولوسم الدنا المعني، وذلك كما هي الحال في تقنية السَّلسَلة التي طورها «F. سانكر» في سبعينات القرن الماضي (3 و 4) والتي لاتزال تشكل أساس معظم السَّلسَلة التي تتم حاليا

نسخ الدنا في الخلايا



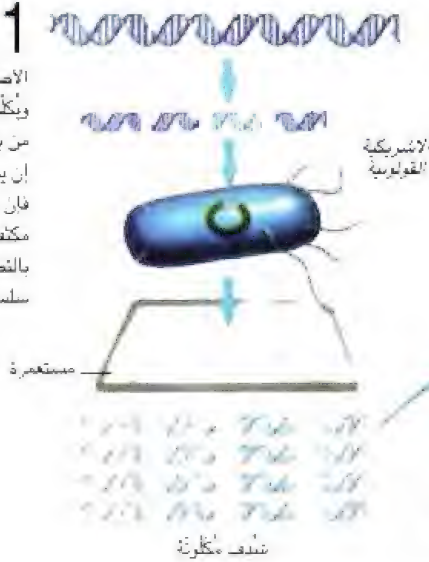
عندما تنسخ خلية ما الدنا الخاص بها، ينفصل الشريطان، ويستعمل **إنزيم البلمرة** polymerase كلا من الشريطين الأصل كقالب **ليركب** synthesize سلسلتين من النكليوتيدات. ويدرز إنزيم آخر، **يعرف بالليگاز (إنزيم الربط)** ligase، هذه الشدف في شريط متصل مقابلا (مشافعا) إياها بالشريط الأصل.

الصناعية، قد تسرِّع هي الأخرى البحث عن مقاييس بيولوجية لمواد «ذكية» جديدة، وعن ميكروبات، يمكن أن تستعمل في التصنيع أو في المعالجة البيولوجية للتلوث.

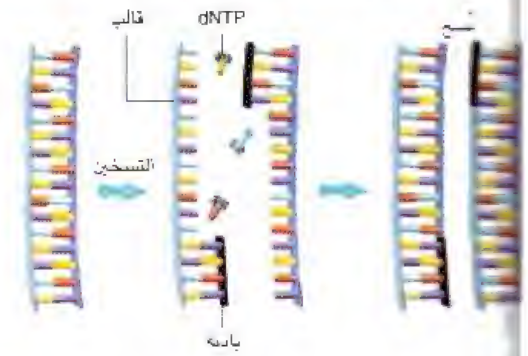
وتبقى التكلفة وحدها العقبة الرئيسية أمام هذه التطبيقات وكثير غيرها، بما في ذلك ما علينا أن نتصوره للمستقبل. ويتحدى مشروعان **لتقانات ثورية في سلسلة الجينومات** Revolutionary Genome Sequencing Technologies تمولهما المعاهد الوطنية للصحة، العلماء، كي يتوصلوا في عام 2009

(*) Overview: DNA Revolutions
(**) Reading DNA
(1) أو طاق أو خيط

1 قبل أسلوب «سانكر» في السلسلة، كان شريط الدنا الأصلي يُجزأ إلى شدف أصغر، ويُكلون (ينسل) ضمن مستعمرات من بكتيرة الإشريكية القولونية. وما إن يتم استخلاصها من البكتيرات، فإن شدف الدنا تُخضع لدورة مكثفة أخرى من النسخ، تعرف بالتصحيح، بسيرورة تسمى تفاعل سلسلة إنزيم البلمرة (PCR).



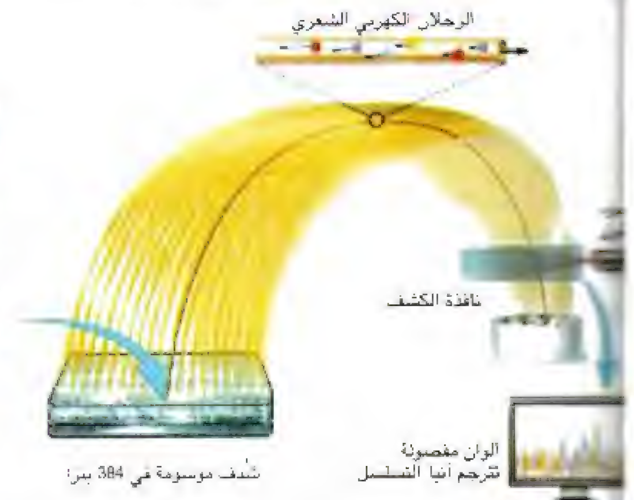
2 تسخن شدف الدنا في أثناء سيرورة التفاعل PCR، فتنشطر إلى شريطين مفردين يُلدِّن annealed عندئذ تسلسل قصير من النكليوتيدات، يعرف بالبادئة (المرشسة)[1] primer بكل قالب أصلي. وانطلاقا من البادئة يربط البوليميراز النكليوتيدات الحرة الطافية (ثالث فسفات ديوكسي نكليوتيد deoxynucleotide triphosphate (dNTP))، ليشكل أشرطة متممة جديدة. وتعاد السيرورة تكرارا، لتوليد ملايين النسخ من كل شُدفة دنا



3 توسم بعدئذ الشُدف الأحادية الطاق بسيرورة مشابهة للتفاعل PCR، ولكن بإضافة نكليوتيدات مُنْهِية terminators موسومة فلوريا (بجزيئات تعرف بثنائي ديوكسي ثالث فسفات النكليوتيد dedoxynucleotide triphosphate (ddNTPs)). تضاف إلى مزيج البادئات والبوليميراز والنكليوتيدات dNTPs، وعندئذ تُبنى الأشرطة المتممة حتى يتم مصادفة انجبال أحد النكليوتيدات ddNTPs، فيتوقف التركيب آنيا. ويكون لنسخ الشدف الناشئة أطوال مختلفة، ويوجد في إحدى نهايتي كل نسخة نكليوتيد موسوم.



4 يفصل الرحلان الكهربائي الشعري capillary electrophoresis الشدف التي تكون مشحونة سلبيا بحملها نحو قطب مشحون إيجابيا. وبالنظر إلى أن أقصر الشدف ينتقل أسرع، فإن ترتيب الشدف يعكس حجومها. ومن ثم يمكن للمنهي أن «يقرأ» على أنه يمثل قواعد القالب. وينشط ضوء الليزر العلاّمة الفلورية fluourescent tag في أثناء مرور الشدف عبر نافذة الكشف، منتجة ألوانا مفصولة، تترجم آنيا إلى تسلسل



إلى سلسلة جينومية للإنسان تكلفتها مئة ألف دولار. وفي عام 2014 بتكلفة ألف دولار فقط. كما أن هنالك إمكانا لإنشاء أسلوب: يمكن تحديده لاحقا، لمنح جائزة نقدية لأول فريق يحقق مثل هذه الاختراقات. إن هذه الأهداف قريبة فعلا. ويوضح مسح للمقاربات الجديدة في تطور طرائق قراءة الجينوم إمكان تحقق خروقات تقانية: يمكن أن تنتج جينوما بشريا بتكلفة قدرها عشرون ألف دولار. في خلال أربع سنوات من الآن. كما أن هذه الخروقات ستلقي الضوء على بعض الاعتبارات التي ستنشأ حال نجاحها

إعادة اكتشاف قراءة الجينات[*]

في أي طريقة من طرائق السلسلة، يمكن لحجم الدنا نفسه وتركيبه ووظيفته أن تشكل عائقا أو يمكن منابلتها كي تصبح ميزات. ويتألف الجينوم البشري من ثلاثة بلايين زوج (شفع) من

(*) Reinventing Gene Reading

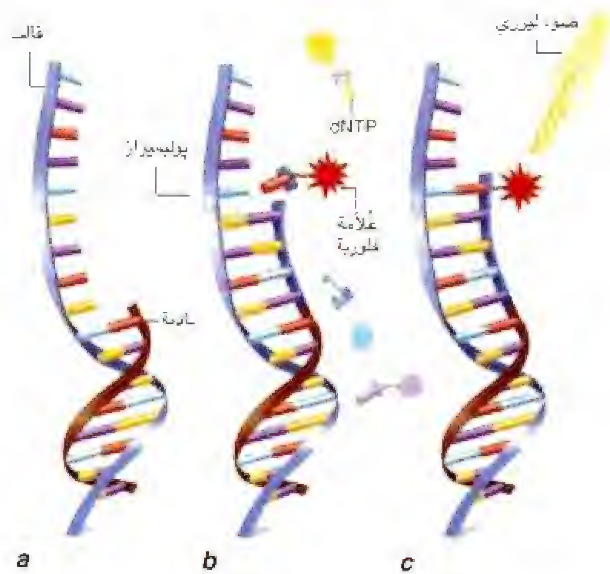
(1) هي شدفة الدنا التي لا بد من ارتباط نكليوتيداتها القليلة (8 نكليوتيدات تقريبا) بالقالب، كي يلتصق بها بوليميراز (إنزيم بلمرة) الدنا DNA polymerase، ويبدأ بتركيب الشريط أو الشُدفة المتممة للقالب: إنها تبدأ تنسّخ الدنا.. أو تركيبه (التحرير)

السلسلة بالتركيب[*]

يحاكي معظم تقانات السلسلة الجديدة أوجها من التركيب الطبيعي للدنا، وذلك بغية تعرف القواعد في شريط دنا معني، إما «بإطالة القواعد» base extension أو «بالربط» legation (الأسفل). وتعتمد كلتا المقاربتين على دورات متكررة من التفاعلات الكيميائية. ولكن التقانتين تخفضان تكاليف السلسلة، وتزيد السرعة بتمنمة التجهيزات لانقاص كمية الكيميائيات المستعملة في الخطوات كلها. وبقراءة ملايين شدف الدنا قراءة متزامنة (الصفحة المقابلة).

إطالة الأسس

تثبت شدفة أحادية الشريط (تعرف بالقالب) على سطح، بحيث تكون نقطة البدء لشريط متمم (يعرف بالبادئة) مرتبط بإحدى نهايتي القالب (a). عندما تعرض نكليوتيدات dNTPs موسومة فلوريا وأنزيم البوليميراز للقالب ستضاف قاعدة متممة للقالب الى شريط البادئة (b). ويزال بعدئذ ما تبقى من البوليميراز والنكليوتيدات dNTPs، ثم ينير ضوء ليزري العلامة الفلورية، كاشفا عن هوية النكليوتيد المتحد الجديد (c). وتنزع عندئذ العلامة الفلورية من النكليوتيد الجديد، ثم تبدأ السيرورة من جديد.

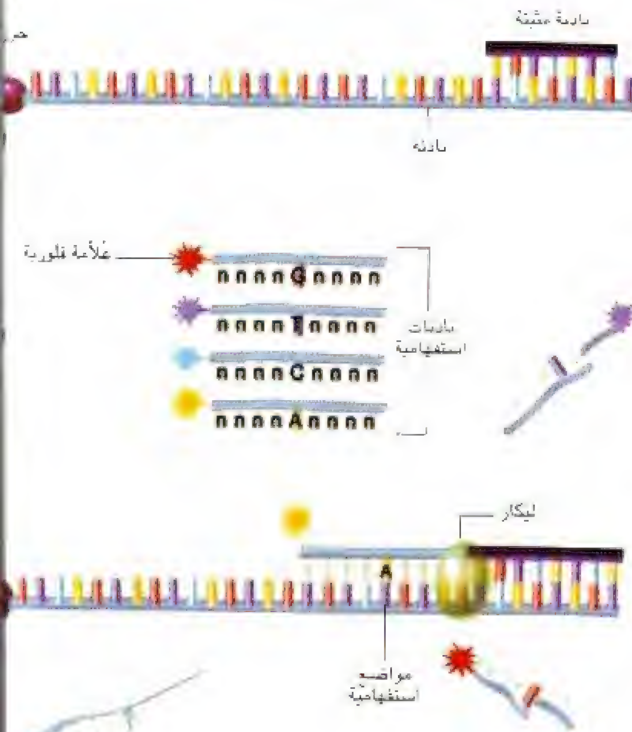




يستعمل كشف بيروفسفات الضيائية الأحيائية bioluminescence عوضا عن الفلورة fluorescence، لتأشير حادثات إطالة القواعد بتحرر جزيء من بيروفسفات عندما تضاف قاعدة الى الشريط المتمم، محدثا تفاعلا كيميائيا مع بروتين ضيائي أحيائي، ينتج وميضا ضوئيا.

الربط

تربط بادئة مثبتة anchor primer بقالب وحيد الشريط لتعيين بداية تسلسل مجهول (a). ثم تضاف «بادئات استفهامية» query primers قصيرة موسومة فلوريا بدءا من دنا شكسي باستثناء نكليوتيد واحد في الموضع الاستفهامي query position يحمل نمطا واحدا من أنماط القواعد الأربعة (b). يقوم الليكاز (إنزيم الربط) بربط واحدة من البادئات بالبادئة المثبتة باتباع أسس تزاوج القواعد ليقابل القاعدة في الموضع الاستفهامي في الشريط القالب (c). وينتزع عندئذ معقد البادئة الاستفهامية المثبتة anchor-query primer complex وتعاد السيرورة من جديد إنما في موضع مختلف من القالب.



جزيئات النكليوتيدات. ويحوي كل نكليوتيد منها واحدا من أربعة أنماط من القواعد (الأسس)، تختصر بالأحرف A و C و G و T. تمثل الفباء الجينوم: مكودة المعلومات المختزنة في الدنا. وترتبط القواعد نمطيا وفقا لمبادئ صارمة لتشكل الدرجات في بنية الدنا المماثلة للسلم. وبسبب قواعد الارتباط هذه، فإن قراءة تسلسل القواعد على طول أحد نصفي السلم، تكشف أيضا عن التسلسل المتمم على النصف الآخر.

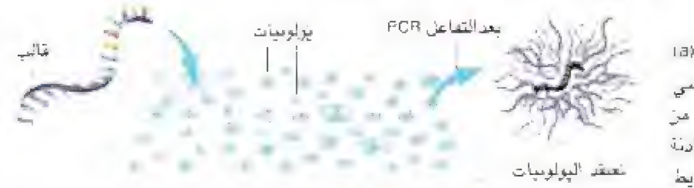
إن جينومنا، ذا الثلاثة بلايين قاعدة مقسم إلى ثلاثة وعشرين صبغيا (كروموزوما) منفصلة. ولدى الناس عادة مجموعتان كاملتان من هذه الصبغيات: واحدة من الأب والأخرى من الأم. تختلف إحداهما عن الأخرى بنسبة واحد في المئة. وهكذا، يمكن القول حقيقة إن الجينوم الشخصي لفرد ما، يحتوي على ستة بلايين زوج من القواعد. إن تعرُّف كل قاعدة من القواعد الأربع في مد (طول) stretch من الجينوم، يتطلب **محسا (جهازا حساسا)** sensor يستطيع كشف الفروق بين أنماط القواعد الأربع. **بمقياس ما دون النانومتر** subnanometer-scale. ويُعتبر **المجهر النفقي الماسح** scanning tunneling microscopy إحدى الأدوات لطريقة فيزيائية

(*) Sequencing By Synthesis

(1) أو ميسم أو سمة

التضخيم

لـ. نظرا الى أنه يصعب التكشف عن الاشارة الضوئية الصادرة عن مجرد جزيء مفرد من الدنا. فإن تفاعلات إطالة القواعد أو تفاعلات الربط غالبا ما تُجرى على نحو متزامن على ملايين النسخ لشريط القالب نفسه. وتنطوي الطرائق اللاخلوية (a و b) لصُنع هذه النسخ على إجراء سيرورة التفاعل PCR على مقياس مصغر



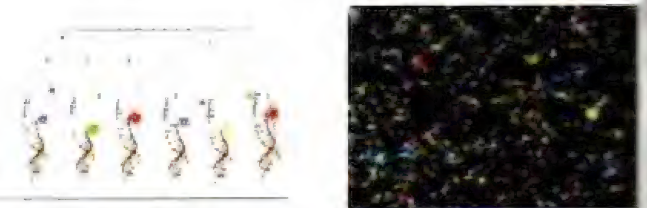
a بولونيات ـ مستعمرات إنزيم البوليميراز ـ تم انشاؤها مباشرة على سطح شريحة مجهرية. أو سطح هلامة gel يحوي كل منها بادئة بامكان شُدفة القالب أن تعثر عليها وترتبط بها. تنتج سيرورة التفاعل PCR ضمن كل بولونية تعنقدا يحوي ملايين نسخ القوالب



b يمكن لقُطيرات من مستحلب زيتي تحوي في داخلها البوليميراز، أن تعمل كمختبرات عابرة في الصغر لسيرورة التفاعل PCR، لتُنتج بولونيات خرزية عندما تضاف شُدفة قالب مرتبطة بخرزة من الخرزات إلى كل قُطيرة. تنتج سيرورة التفاعل PCR عشرة ملايين نسخة من القالب، جميعها مرتبطة بالخرزة

إنشاء المضاعفات

لـ سلسلة الاف أو ملايين الشُدف القالبية على نحو متوازٍ، يزيد سرعة السَلْسَلة إلى الحد الأقصى. ويمكن في نظام إطالة قاعدة جزيء مفرد، وباستخدام كشف اشارة فلورية، مثلا، تجميع مئات الملايين من شُدف قوالب مختلفة على صفيفة مفردة (الشكل السفلي في اليسار). وفي طريقة أخرى، يتم تجميد ملايين البولونيات الخرزية على سطح ملائمة خاصة. معبة السَلْسَلة المتزامنة بطريقة الربط وبالاشارات الفلورية، تظهر في الصورة السفلية اليمنى، التي تمثل 0.01 في المئة من المساحة الكلية للشريحة المجهرية



بولونيات خرزية — صفيفة جزيئية مفردة

يمكن بوساطتها أن نرى هذه البنى الفائقة الصغر، ونميز بعضها من بعض. ولكن قراءة ملايين أو بلايين القواعد، تعني قطعا أن على معظم تقانات السَلْسَلة أن تعتمد في مرحلة ما على الكيمياء.

وصارت الطريقة، التي طورها «F. سانكر» في السبعينات، هي المتبعة على نطاق واسع في مشروع الجينوم البشري (HGP)، ولا تزال العنصر الأساسي لمعظم أعمال السَلْسَلة التي تُنجز حاليا. وتوصف التقنية أحيانا بأنها السلسلة بالفصل. وتتطلب دورات عديدة من التضاعف لإنتاج أعداد كبيرة من نُسخ من المدّ الجينومي موضع الاهتمام. وتنتج الدورة الأخيرة نسخة من شُدف متغايرة الأطوال تنتهي كل شدفة منها **بقاعدة موسومة فلوريا (تألقيا)** flourescently tagged base. وعند فصل تلك الشدف وفقا لأحجامها بسيرورة تُعرف بالرحلان الكهربائي، ثم قراءة الإشارة الفلورية لكل **عُلامة طرفية** terminal tag عند مرورها بوساطة منظار خاص، فإننا نحصل على تسلسل القواعد في **شريط** strand الدنا الأصلي [انظر *الإطار في الصفحتين 22 و 23*].

وتشكل الوثوقية والدقة ميزتين أساسيتين لسلسلة «سانكر». ومع أن تحسينات كثيرة أدخلت على التقنية عبر السنوات، فإنها تبقى مبددة للوقت ومكلفة. لذا، فإن معظم مقاربات السلسلة البديلة عن طريقة «سانكر»، تسعى إلى زيادة السرعة وتخفيض التكلفة، بحذف خطوات الفصل البطيئة ونمنمة المكونات لإنقاص حجوم الكيماويات، وإجراء التفاعلات بطريقة التوازي المفرطة التعدد؛ بحيث تُقرأ ملايين شدف التسلسل في وقت واحد.

وتقاربت مجموعات بحثية كثيرة على طرائق، كثيرا ما جمعت مع بعضها تحت عنوان السَلْسَلة **بالتركيب** synthesis، ذلك أنها تفيد من السيرورات العالية الدقة، التي تستعملها المنظومات الحية في نسخ جينوماتها وتصليحها. فمثلا، عندما تستعد خلية للانقسام، تنفصل قائمتا سلم جزيء الدنا إلى شريطين. وعندئذ يتحرك إنزيم، يُعرف بالبوليميراز (إنزيم البلمرة) على طول الشريطين (الطاقين) وباستعماله الشريط الأصلي (القديم) **كقالب**[1] template، وباتباعه مبادئ تزاوج (تشافع) القواعد، فإن البوليميراز يحفز إضافة نكليوتيدات، ليشكل تسلسلات متممة. ويقوم إنزيم آخر، يعرف بالليكاز (إنزيم الربط) بوصل هذه القطع - لتتشكل أشرطة جديدة تكون متممة بالكامل للقوالب الأصلية.

وتحاكي طرائق السَلْسَلة بالتركيب أجزاء من هذه السيرورة، على شريط دنا مفرد موضع الاهتمام. فما إن تبدأ سيرورة إضافة القواعد عن طريق البوليميراز عند نقطة البدء الخاصة بالشريط المتمم الجديد - ويعرف **بالبادئة (المرشّدة)** primer - أو ما إن يتم تعرف نقطة البدء هذه من قبل إنزيم الليكاز كشريط تزاوجي - تتامي - حتى يتم الكشف عن تسلسل القالب.

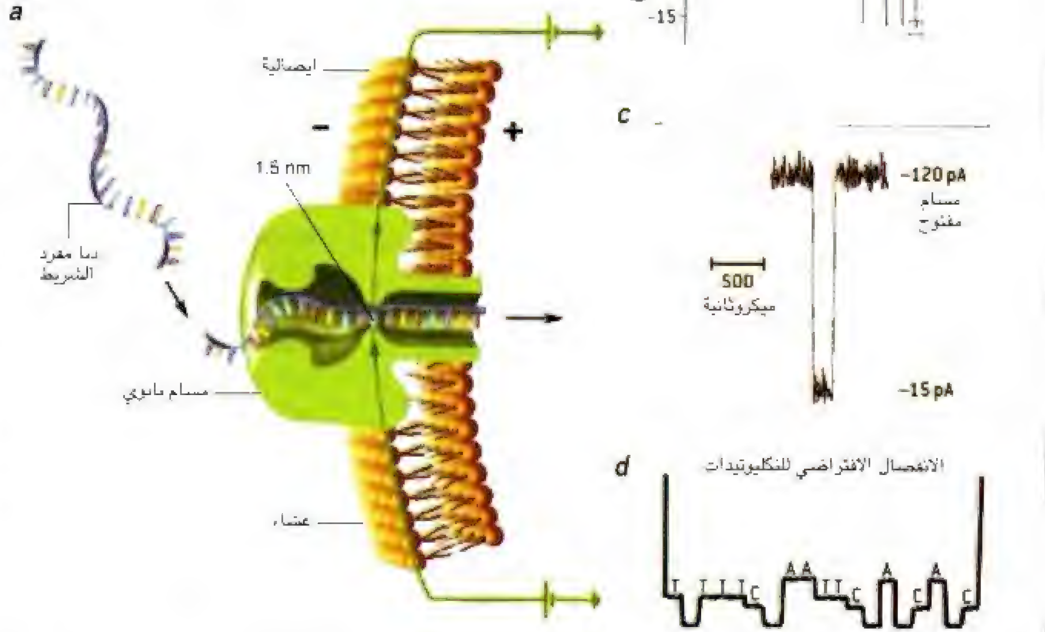
وغني عن البيان أن طرائق الكشف هذه تتفاوت بين المجموعات البحثية، ولكنها جميعها تستعمل بالتأكيد نمطا من نمطين إشاريين. فإذا ما تم ربط جزيء **فلوري** fluorescent بالقواعد المضافة، فإنه يمكن رؤية الإشارة اللونية بمجهر ضوئي. ويتم استعمال كشف **الفلورة** fluorescence في كل من سيرورتي **إطالة القواعد** base-extension **وسلسلة الربط** ligation sequencing، من قبل مجموعات بحثية كثيرة، بما في ذلك «M. مزكر» وزملاؤه [في جامعة بيلور] و«R. ميترا» [في جامعة واشنطن سانت لويس] ومن قبل

(1) ما يحدث فعلا أن الشريط - نظرا الى ضالة حجمه نسبة إلى الإنزيم - هو الذي يعبر نفقا في جزيء الإنزيم، ويتم التركيب.

(2) هو شريط (أو شُدفة) الدنا، الذي يتم تركيب شريط (أو شُدفة) متمم له بالتقابل بوساطة إنزيم بوليميراز الدنا في الطور S من الدورة الخلوية، أو في المختبر. فهو يدل الإنزيم على التسلسل الذي يعتزم بناؤه، ويرشده الى وضع النكليوتيدات المتممة بالتقابل. (التحرير)

السَّلسَلة النانوية المسام(*)

يتم في هذه التقنية، على غرار الرحلان الكهربائي، سحب الدنا باتجاه شحنة موجبة. ولكي يصل تلك النقطة، على الجزيء أن يعبر غشاءً من خلال مسام (ثقب) يبلغ قطره الأضيق 1.5 نانومتر (nm). سيسمح فقط لشريط دنا منفرد أن يمر عبره (a). وعند مرور شريط الدنا عبر المسام، تسد النكليوتيدات الفتحة بلحظة خاطفة، وهذا يغير من الإيصالية الكهربائية للغشاء - التي تقاس بالبيكوامبير (pA). وتنتج الفروق الفيزيائية بين الأنماط الأربعة للقواعد عوائق مختلفة الدرجات والدوام (b). ويُظهر فحص دقيق لقياس حادثة الانحصار (الإعاقة) تغيرا في الإيصالية عند مرور شريط طوله 150 نكليوتيدا لنمط واحد من القواعد عبر المسام (c). وبإدخال تحسينات على هذه الطريقة لرفع تميزها لقواعد منفردة، يمكن أن تنتج فصلا لتسلسل القواعد بعضها عن بعض - كما هو موضح في المثال الافتراضي المبين في الأسفل (d). وهذا سيسفر عن تقنية سلسلة بوسعها أن تقرأ كامل الجينوم البشري في خلال 20 ساعة فقط، بمنأى عن خطوات النسخ والتفاعلات الكيميائية المكلفة.



المختبر الخاص بي في كلية طب هارفرد، ومن قبل أجنكورت بيوساينس كوربوريشن Agencourt Bioscience Corporation.

وتستعمل طريقة بديلة **بروتينات ضيائية أحيائية** bioluminescent proteins، كإنزيم اللوسيفراز **لليراعة**[1] firefly، وذلك لكشف مركب بيروفسفات الذي يتحرر عند ارتباط قاعدة بشريط البادئة. ويستعمل هذا النظام، الذي طوره <M. روناگي> [ويعمل في جامعة ستانفورد] كل من شركتي بيروسيكونسينك/بيوتاگ و454 لايف ساينسز.

ويتطلب عادة كلا شكلي الكشف شواهد متعددة لتفاعل المزاوجة لكي يحدث في اللحظة ذاتها، كي يصدر إشارة على درجة من القوة بحيث يمكن رؤيتها، وبذلك يمكن اختبار كثير من نسخ التسلسل المعني على نحو متزامن. ولكن بعض الباحثين يعمل حاليا على طريقة تُكشف بوساطتها إشارات فلورية، تصدر عن جزيء واحد فقط للشريط القالب. ويتبنى مقاربة الجزيء المفرد هذه كل من <S. كووك> [من معهد كاليفورنيا للتقانة] وعلماء في شركتي هيليكوس بيوساينسز ونانوفلوديكس، بهدف اقتصاد الوقت والتكلفة، وذلك باستبعاد الحاجة إلى صنع نسخ من القالب الذي ستتم سلسلته.

وينطوي كشف جزيئات فلورية مفردة على كثير من التحدي، لأن ما يقرب من خمسة في المئة يفقد خلال الكشف، ولابد عندئذ من أخذ «قراءات» أكثر لتلافي أخطاء الفجوات الناجمة عن هذا الإخفاق في الكشف. ولهذا السبب فإن معظم مجموعات البحث، يعمد أولا إلى نسخ، أو تضخيم، قالب الدنا المفرد المعني، بسيرورة تعرف **بتفاعل سلسلة البوليميراز** polymerase chain reaction (PCR). ويبرز في هذه الخطوة أيضا تنوع من المقاربات، جعل أمر استعمال البكتيرات[2] لتوليد نسخ من الدنا غير ضروري.

ووفقا لطريقة تضخيم لاخلوية طورها <D. كاواشيما> [من معهد سيرونو لأبحاث الصيدلانيات في جنيف] و<A. شيتڤيرين> [من الأكاديمية الروسية للعلوم] و«ميترا» [عندما كان في هارفرد] يتم إنشاء **مستعمرات منفردة من البوليميراز** Individual colonies of polymerase (**پولونيات**[3] polonies) تُنشر طليقة كصُفيفات على سطح شريحة مجهرية، أو على سطح طبقة من **الهلامة** gel ويُخضع جزيء قالب الدنا المفرد داخل كل پولونية للتفاعل PCR، وهذا يؤدي إلى إنتاج ملايين النسخ، التي تنمو في الواقع مثل مستعمرة بكتيرية، من القالب الأصلي المركزي. ولأن كل تجمع پولوني ناتج يكون عرضة

(*) Nanopore Sequencing

(1) اليراعة ليست ذبابا على الإطلاق، وإنما هي من الحشرات الغمدية الأجنحة التي تضم الخنافس والسوس [انظر: «كيف تضيء اليراعات ولماذا؟»، **العلوم**، العددان 7/6 (2006)، ص 82]

(2) ومفردها بكتيرة

(3) ومفردها پولونية
(التحرير)

مشروع الجينوم الشخصي[٢]

يختبر كل رضيع يولد حاليا في الولايات المتحدة لمرض وراثي واحد على الأقل، هو بيلة **الفنيل كيتون** phenylketonuria، وذلك قبل أن يغادر المستشفى. كما يختبر بعض المرضى بسرطان الرئة لتباينات في جينة رمزها EGFR لمعرفة فيما إذا كان من المحتمل أن يستجيبوا للعقّار إيريسا Iressa. ويتزايد استعمال الاختبارات الجينية، التي تشير إلى الكيفية التي سوف **يستقلب** metabolize بها المريض عقاقير أخرى، لتحديد الجرعة الدوائية. ويمكن التلميح فعلا إلى أن بدايات أدوية تلائم كل شخص ستغدو ممكنة بجينومات شخصية رخيصة، فضلا عن تزايد الحاجة إليها.

ونحتاج أيضا، بعد الاهتمامات الصحية، إلى أن نعرف سلسلة نسبنا. فكم نسبنا قريب من «جنكيز خان»، أو بعضنا من بعض؟ إننا نرغب في معرفة تأثرات الجينات مع جينات أخرى، ومع البيئة التي تُشكل وجوهنا وأجسامنا وأمزجتنا وميولنا. وستجعل آلاف أو ملايين مجموعات البيانات، التي تشمل كامل جينوم الفرد **وفينومه (طرازه المظهري)** phenome ـ الخلال التي تنتج من التعليمات المكوَّدة في الجينوم ـ من الممكن البدء بحل بعض تلك المسالك المعقدة.

ومع هذا، فإن احتمالات نجاح هذا النمط الجديد من المعلومات الشخصية، التي أضحت متاحة على حين غرة، تبعث أيضا على القلق إزاء كيفية سوء استعمالها المحتمل من قبل المؤمِّنين وأرباب العمل والقائمين على تنفيذ القانون بالقوة والأصدقاء والجيران وأصحاب المصالح التجارية والمجرمين.

لا يمكن لأحد أن يتنبأ بما سيكون عليه العيش في عصر الجينومات الشخصية حتى يوضع هذا كله موضع الاختبار. لهذا السبب بالذات، بادرت مع زملائي، حديثا، إلى طرح **مشروع الجينوم الشخصي** Personal Genome Project (PGP) ونأمل بهذه الخطوة الطبيعية التالية **لمشروع الجينوم البشري** Human Genome Project (HGP)، أن نستكشف الفوائد والأخطار للجينومات الشخصية بتعبئة متطوعين لجعل البيانات



يُعدُّ <G. M. تشرش>، الذي يظهر هنا مع بولونيات فلورية، واحدا من مجموعة متطوعين يخططون لكشف جينوماتهم للفحص العلني.

الجينومية والفينومية الخاصة بهم متاحة للجميع.

وستشمل هذه المواد تسلسلات كامل الجينوم (46 صبغيا) لكل متطوع، والسجلات الطبية الرقمية؛ إضافة إلى المعلومات التي يمكن أن تصبح يوما ما جزءا من السيرة الصحية الشخصية، كالبيانات الشاملة عن **الرنا** RNA والپروتينات ومقاييس الجسم والوجه **والتصوير بالرنين المغنطيسي** magnetic resonance imaging (MRI)، وأنماط التصوير الأخرى ذات الأهمية الحاسمة. وسنعمد أيضا إلى إنشاء وإيداع سلالات خلوية بشرية، تمثل كل شخص، في مستودع كوزييل التابع **للمعهد الوطني للعلوم الطبية العامة** National institute of General Medical Sciences. ونهدف أيضا إلى جعل جميع هذه المعلومات الخاصة بالجينومات والخلال سهلة المنال على نطاق واسع، ينقب فيها كل من يرغب ليختبر فرضياته وخوارزمياته (حساباته) الخاصة به، ولتكون مصدر إلهام له، يستنبط بوساطتها فرضيات وخوارزميات جديدة.

وتزودنا حادثة جديدة بمثال بسيط لما يمكن أن يحدث. إن سجلات طبية قليلة من المشروع PGP ـ بما في ذلك سجلي الشخصي ـ متاحة على نطاق واسع في نظام **على الخط** online على الإنترنت، وهذا دعا أحد المختصين بأمراض الدم في الجانب الآخر من الولايات (الأمريكية) أن يلاحظ ويبلغني أنه كان عليَّ منذ زمن بعيد إجراء اختبار متابعة لمداواتي للكولسترول. لقد أدت هذه المعلومة المفيدة إلى تعديل الجرعة والغذاء، ومن ثم إلى تخفيض درامي لنمط واحد على الأقل من المجازفة. ولن تكون هذه التجربة في المستقبل منوطة بموهبة تأتي عبر القارة (الأمريكية)، بل يمكن أن تولد صناعة جديدة، يقوم بها طرف ثالث، لأدوات برمجة جينومية.

ولقد حظي المشروع PGP بموافقة مجلس التقويم الداخلي لكلية هارڤرد. وكجميع الأفراد الذين تتناولهم الأبحاث على الإنسان، فإنه يجب توضيح الأخطار الكامنة للمشاركين قبل أن يوافقوا على توفير البيانات الخاصة بهم. وسيكون بوسع كل متطوع يُعبأ لبرنامج PGP أن يراجع أيضا التجارب الخاصة للأفراد السابقين قبل أن يعطي موافقة واعية. وستكون الطبيعة المكشوفة للبرنامج، بما في ذلك التعريف الكامل بالأفراد وببياناتهم، أقل خطرا على كل من الأفراد والبرنامج من الطبيعة البديلة التي تُعد بالخصوصية والسرية، وتكون عرضة لمخاطر النشر العرضي للمعلومات، أو بإمكان الوصول إليها من قبل المتسللين.

ومثلما سياسة حرية الوصول المجانية للبيانات، التي انتهجها مشروع الجينوم البشري (HGP)، فإن مكشوفية المشروع PGP مصممة لزيادة كمون الاكتشاف إلى الحد الأعلى. وإضافة إلى توفيره موارد علمية جديدة، يقدم البرنامج تجربة لحرية الوصول العلنية ولتغطية التأمين. وسيساعد المانحون الخصوصيون في المراحل المبكرة للبرنامج على ضمان وجود مجموعة متنوعة من الأفراد، تقف عائقا أمام إمكان معاناتهم من تمييز وراثي نتيجة لاشتراكهم في البرنامج PGP. وتمتلك هذه الآلية، التي يحركها حب المرء لإخوانه في الإنسانية، حسنة أنها لا تحتاج في البداية إلى أن تكون ربحية بيد أن شركات التأمين ستكون، مع ذلك، شديدة الاهتمام في نتيجة هذا المشروع.

يمكن العثور على تفاصيل المشروع PGP في الموقع http://arep.med.harvard.edu/ PGP/

ميكرونا واحدا وحجمه فمتولترا[٤] واحدا. فإن شريحة مجهرية مفردة، تستوعب على سطحها بلايين البولونيات.

وإجراء تغير في هذا النظام ينتج لأول مرة بولونية على خرزات غاية في الصغر، تتوضع داخل قطيرات ضمن مستحلب. ويمكن، بعد حدوث التفاعل، وضع ملايين من هذه الخرزات، التي تحمل كل منها نسخا من قالب مختلف، في **نُقَر** wells مستقلة في الشريحة، أو تثبيتها بوساطة هلامة، حيث تنجز السلسلة في الخرزات جميعها على نحو متزامن.

وليست هذه الطرائق لتضخيم القالب وللسلسلة **بإطالة القواعد** base extension أو **بالربط** ligation سوى أمثلة قليلة للمقاربات التي تتبناها دزينة من المجموعات والشركات البحثية الأكاديمية المختلفة **للسلسلة بالتركيب** squencing by synthesis.

كما أن تقنية أخرى، وهي السَّلسلة بالتهجين، تستعمل الفلْورة

(٢) The Personal Genome Project

(٤) الفمتولتر femtoliter: 10^{-15} لتر

لتوليد إشارة مرئية. وتستثمر، كما هي الحال في تقنية السَّلسلة بالربط، خاصيةَ نزوع أشرطة الدنا إلى أن تترابط (تتشافع) أو إلى أن تتهجن مع التسلسلات المتممة لها وليس مع التسلسلات غير المترابطة. إن هذا النظام، الذي تستعمله الشركات أفيمتريكس وبيرلجن سايَنسز Perlegen Sciences وإلومينا Illumina، والذي يبحث في المقام الأول عن التباينات في تسلسلات جينوم معروف، هو فعلا قيد الاستعمال التجاري الواسع الانتشار. ويتطلب هذا النظام تركيب أشرطة مفردة قصيرة من الدنا في كل تضامنية ممكنة لتسلسلات القواعد ثم تنظيمها (تصفيفها) على شريحة كبيرة. وعندما يمرر محلول يحوي نسخا من الشريط القالب ذي التسلسل المجهول عبر هذه **الصُّفيفة** array، فإن هذه النسخ ستترابط بالتسلسلات المتممة لها. ويُصدر أفضل **تزاوج (ترابط)** match الإشارة الفلورية الأكثر سطوعا. وتضيف الشركة إلومينا أيضا خطوة **إطالة القواعد** base extension لهذا الاختبار **لنوعية التهجين** hybridization specificity.

وتتناول تقنية أخيرة ذات واعدية مرموقة على المدى البعيد مقاربة مختلفة كليا لتعرّف أفراد القواعد في جزيء الدنا. وتركز هذه القواعد بكشف البيروفسفات في صُفيفة من النُّقر. وقرأت كل مجموعة من المجموعتين الكمية نفسها من التسلسل: أي 30 مليون زوج من القواعد، في كل **دورة** run سلسلة. وفي حين أن نظامنا قرأ نحو 400 زوج من القواعد في الثانية الواحدة، فإن نظام مجموعة 454 قرأ 1700 في الثانية. وتنطوي السلسلة عادة على أداء دورات متعددة لإنتاج تسلسل **توافقي** consensus أكثر دقة. وبتغطية قدرها 43 مرة (43x)؛ أي 43 دورة لكل قاعدة للجينوم المستهدف، فإن المجموعة 454 أنجزت دقة قدرها خطأ واحد في كل 2500 زوج من القواعد. أما مجموعة هارڤرد فتوصلت إلى أقل من خطأ واحد في كل ثلاثة ملايين زوج من القواعد، وبتغطية قدرها 7x (سبع مرات). ولمناولة القوالب استعمل كلا الفريقين خرزات **أسرة** capture، انعكس حجمها على كمية الكواشف الغالية المستهلكة. وكان قطر الخرزة التي استعملتها مجموعتنا ميكرونا واحدا، في حين أن المجموعة 454 استعملت خرزات قطر الواحدة منها 28 ميكرونا، في نُقر سعة كل منها 75 بيكولتر (75×10^{-12} لتر).

إن وسطي تكلفة أفضل طرائق السلسلة المتاحة والقائمة على

لدينا كثير من العمل وقليل من الوقت كي ترقى جاهزيتنا لمستوى الجينومات المنخفضة التكلفة.

الطرائق، التي جُمعت كلها تحت عنوان **السَّلسلة النانوية المسام** nanopore، على الفروق الفيزيائية بين أنماط القواعد الأربعة، كي تنتج إشارة مقروءة. فعندما يمر شريط مفرد من الدنا عبر مسام قطره 1.5 نانومتر، فإنه يحدث تموجات في **الإيصالية الكهربائية** conductance للمسام. وينتج كل نمط من القواعد تغيرا طفيفا مختلفا في الإيصالية، يمكن استعماله لتعرّفه [*انظر الإطار في الصفحة 26*]. إن هذه الطريقة، التي ابتكرتها و«د. برانتون» [من هارڤرد] و«د. ديمر» [من جامعة كاليفورنيا في سانتا كروز] لا تزال قيد التطوير من قبل الشركة أجيلانت تكنولوجيز Agilent Technologies وآخرين، حيث يتم إدخال تعديلات مهمة، مثل كشف إشارة التفلور.

تخفيض التكلفة

إن تقويم أنظمة الجيل التالي للسلسلة هذه بمقارنة بعضها ببعض وبطريقة «سانكر» يوضح بعض العوامل التي ستؤثر في مدى نفع كل منها. فمثلا، نشرت مؤخرا مجموعتان بحثيتان، الأولى مجموعتي في هارڤرد والثانية من الشركة 454 لايف ساينسز، توصيفات مُحكّمة لمشاريع مقياس سلسلة الجينوم، تسمح بالمقارنات المباشرة.

فلقد وصفتُ مع زملائي سلسلة بنظام الربط، تستعمل تضخيم خرزات **بولونية** polony لدنا القالب، ومجهرا رقميا عاديا لقراءة إشارات التفلور. واستعملت مجموعة 454 تقنية مماثلة من التفاعل PCR في مستحلب الزيت للتضخيم، متبوعة بسلسلة إطالة

الرحلان الكهربائي هو دولار واحد لكل 150 زوجا من القواعد في كل تسلسل منجز. ولم تنشر المجموعة 454 التكلفة على أساس المشروع، لكن فريق هارڤرد أنجز تسلسلا بتكلفة دولار واحد لكل 1400 زوج من القواعد، وهذا يمثل تخفيضا في التكلفة قدره تسعة أمثال.

ويُتوقع قريبا جدا أن تخفض هذه التقنيات الجديدة وغيرها تكلفة سلسلة البلايين الستة لأزواج القواعد لجينوم أي منا إلى مئة ألف دولار. وستتوقف محاولة تخفيض التكلفة إلى قيمة أقل في أي حيل تال من طرق السَّلسلة على بضعة عوامل أساسية. وبالنظر إلى أن الأتمتة أضحت حاليا أمرا مألوفا في الأنظمة كافة، فإن الإنفاق الأكبر سيكون على الكواشف الكيميائية والتجهيزات. ولقد خفّضت **المنمنمة** miniaturization فعلا استعمال الكواشف بالقياس إلى تفاعلات «سانكر» التقليدية بمقدار بليون ضعف؛ أي من ميكرولتر (10^{-6} لتر) إلى فمتولتر (10^{-15} لتر).

ويمكن لأجهزة تصوير تحليلية عديدة أن تجمع بيانات أولية بمعدلات تصل إلى بليون بايت (**جيكابايت** gigabyte) في الدقيقة الواحدة، ويمكن لحواسيب أن تعالج المعلومات بسرعة قدرها بلايين عديدة من العمليات في الثانية. لذا، فإن أي جهاز تصوير مقيد بسيرورات فيزيائية أو كيميائية بطيئة، كالرحلان الكهربائي أو التفاعل الإنزيمي، أو أي نظام غير مرزوم رزما محكما في الحيز أو الزمن، ويحصي كل **خرزة** pixel من الخرزات، سيكون بالتوازي ذا تكلفة تشغيل عالية، لكل وحدة قاعدة دنا يتم تحديدها.

Lowering Cost (...)

ويتمثل اعتبار آخر في الحكم على تقانات السلسلة الناشئة بكيفية استعمالها. وتنزع الطرائق الجديدة إلى تبني قراءة تسلسلات قصيرة: يراوح طولها ما بين 5 و 400 زوج من القواعد مقارنة بطول 800 زوج من القواعد في القراءة النمطية في تقنية «سانكر». ولذلك تكون سلسلة قطع الدنا، ووضعها متتالية بعضها في إثر بعض لجينوم غير معروف مسبقا بدءا من لا شيء، أكثر صعوبة في التقانات الجديدة. ولكن إذا كان الطب هو المحرك الرئيسي لسلسلة واسعة النطاق، فعلينا عندئذ أن نعيد سلسلة الجينوم البشري للبحث عن اختلافات ضئيلة جدا في دنا الأفراد. ولن تمثل، والحالة هذه، قراءة أطوال التسلسلات القصيرة مشكلة تقنية.

وستكون أيضا متطلبات الدقة من وظائف التطبيقات. فقد تتطلب الاستعمالات التشخيصية تخفيضا لمعدلات الخطأ إلى ما دون المعيار الحالي الذي يستعمله مشروع الجينوم البشري HGP وهو 0.01 في المئة؛ لأن هذا المعيار مازال يتيح الفرصة لـ600 000 خطأ في كل جينوم بشري. ومن جهة أخرى فقد ثبت أن معدلا عاليا من الخطأ (4 في المئة) في **اعتيان** sampling عشوائي للجينوم يكون مفيدا في اكتشاف الأنماط المختلفة **للرنا** RNA وللنُّسُج، وفي تصنيفها. كما أن استراتيجية مماثلة «**قسرية**» shotgun تطبق في الاعتيان البيئي، حيث إن عددا ضئيلا مثل 20 زوجا من القواعد، يكفي لتعرف كائن حي في نظام بيئي.

إعلاء القيمة(*)

ولدينا، وراء تطوير هذه التقانات الجديدة للسلسلة، كثير من العمل لننجزه، في خلال فترة قصيرة من الوقت كي ترقى جاهزيتنا لحلول عصر قراءة الجينوم المنخفض التكلفة. وستكون هنالك حاجة إلى برمجيات لمعالجة معلومات التسلسل كي تصبح، على سبيل المثال، طيعة للأطباء. وسيحتاجون إلى طريقة، تُشتق بوساطتها قائمة بالأولوية ذات الطابع الفردي لكل مريض فيما يتعلق بالاختلافات الجينية العشرة الأولى، أو نحو ذلك، التي يرجح أن تكون مهمة. وسيكون جوهريا على حد سواء، تقييم تأثيرات الإتاحة الواسعة النطاق لهذه التقانة لدى الناس.

لقد أقام المشروع HGP منذ استهلاله برنامجا بتكلفة عشرة ملايين دولار سنويا لدراسة القضايا الأخلاقية والقانونية والاجتماعية، التي ستطرحها سلسلة الجينوم البشري، والتصدي لإشكالاتها. واتفق المشاركون في هذا المسعى على جعل بياناتنا جميعها متاحة علانية بسرعة غير مسبوقة ـ في خلال أسبوع من الاكتشاف. ووقفنا في وجه المحاولات التي تسعى إلى الاتجار بالطبيعة البشرية. ووجه اهتمام خاص إلى حماية **الغُفلية**(1) anonymity لجينومات الناس (إن «الجينوم البشري» الذي قمنا بسلسلته كان فسيفساء لصبغيات عدة أفراد من الناس). ولكن كثيرا من الأسئلة الرئيسية حقا لا يزال قائما، مثل الكيفية التي نضمن بها الخصوصية والعدالة في استعمال المعلومات الجينية الشخصية من قبل العلماء، وشركات التأمين وأرباب العمل والمحاكم والمدارس ووكالات التبني والحكومة والأفراد الذين عليهم أن يتخذوا قرارات سريرية وإنجابية (توالدية).

وتحتاج هذه الأسئلة الصعبة والمهمة إلى أن تُبحث بصرامة مثل أوجه الاكتشافات التقانية والبيولوجية **للجينوميات** genomics البشرية. وبهذا القصد، استهللتُ مع زملائي **برنامجا جينوميا شخصيا** Personal Genome Project [*انظر الإطار في الصفحة 27*]، للبدء باستكشاف الأخطار الكامنة، ومزايا العيش في عصر الجينوميات الشخصية.

وعندما نستثمر في أسهم أو ملكيات ثابتة أو علاقات، فإننا ندرك سلفا أنه ما من شيء موثوق، ونفكر احتماليا في الأخطار مقابل القيمة، مدركين مسبقا أن الأسواق معقدة كالحياة. وتماما مثل ما أحدثته في التقانات الرقمية الشخصية من ثورات اقتصادية واجتماعية وعلمية، لم يكن لأحد أن يتصورها عندما استعملنا الحواسيب القليلة الأولى، علينا أن نتوقع ونهيئ أنفسنا لتغيرات مماثلة، وذلك في الوقت الذي نرتحل فيه إلى الأمام، منطلقين من جينوماتنا القليلة الأولى. ■

(*) Raising Value

(1) غفلا من الاسم (غير منسوب لفرد بعينه).

المؤلف

George M. Church

أستاذ الوراثيات في كلية طب هارفرد، ومدير مركز هارفرد-ليبر للوراثيات الحسابية التابع لمختبر التقانة الجينومية في وزارة الطاقة الأمريكية، ومراكز التميز لعلم الجينومات التابعة للمعاهد الوطنية للصحة. وتجسر أبحاثه وتكامل تقانات تحليل وتخليق الجزيئات الأحيائية والخلايا. يملك عشر براءات اختراع أمريكية، وقد عمل مرشدا علميا لأكثر من عشرين شركة.

مراجع للاستزادة

Advanced Sequencing Technologies: Methods and Goals. Jay Shendure, Robi D. Mitra, Chris Varma and George M. Church in *Nature Reviews Genetics*, Vol. 5, pages 335–344; May 2004

How Sequencing Is Done. DOE Joint Genome Institute, U.S. Dept. of Energy, Office of Science, updated September 9, 2004. Available at **www.jgi.doe.gov/education/how/index.html**

NHGRI Seeks Next Generation of Sequencing Technologies. October 2004 news release available at **www.genome.gov/12513210**

Accurate Multiplex Polony Sequencing of an Evolved Bacterial Genome. Jay Shendure et al. in *Science*, Vol. 309, pages 1728–1732; September 9, 2005.

Genome Sequencing in Microfabricated High-Density Picolitre Reactors. Marcel Margulies et al. in *Nature*, Vol. 437, pages 376–380; September 15, 2005.

Scientific American, January 2006

نحو سيطرة أفضل على الألم(*)

إن التقدم في فهمنا للخلايا والجزيئات التي تنقل إشارات الألم في أجسادنا يسهم في تحقيق أهداف لأدوية جديدة يمكنها تسكين أنواع مختلفة من الألم، بما فيها تلك التي لا يمكن السيطرة عليها بالمعالجات المتوافرة حاليا.

<A. I. باسباوم> ـ <D. جوليُس>

يظهر الألم بطيف واسع من الأحاسيس البغيضة. فهناك الألم النابض والألم الداعي للحك والوجع الخفيف المستمر والألم الواخز والقارص والطارق والثاقب. إلا أن جميع أنواع الألم هذه تشترك بشيء واحد، وهو أن من يعانيه يتمنى بشغف زواله!

ومعظم مسكنات الألم التي تستخدم اليوم هي بالأساس علاجات شعبية بقيت تُستهلك خلال عدة قرون: فالمورفين morphine والأفيونات الأخرى تستخرج من **نبات الخشخاش** opium poppy، والأسپرين وبقية مضادات الالتهابات اللاستيرويدية (NSAIDs) مثل إيبيوپروفين ibuprofen لا تجدي في بعض الآلام المعندة. وحتى الأفيونات التي تعتبر أقوى المسكنات، لا تفيد كل إنسان؛ كما أن لها مضاعفات جانبية مهمة، ومن شأنها رفع عتبة المرضى على احتمال الألم، وهذا يجعلهم يحتاجون إلى جرعات متزايدة للحصول على الراحة من أوجاعهم.

خلال العشرين سنة الماضية، تعلم إخصائيو العلوم الحيوية العصبية الكثير من الدراسات الخلوية والجزيئات المختصة التي تنقل إشارات الألم في جسم الإنسان. واليوم تستخدم هذه المعرفة لتكوين استراتيجيات جديدة لتدبير الألم بشكل أفضل وبآثار جانبية أقل. ويمكن القول إن الاتجاهات العلاجية التي تُستقصى الآن للسيطرة على الألم هي من الكثرة بحيث لا يمكننا الإحاطة بجميعها في هذه المقالة

شرارات من نار(**)

في القرن السابع عشر أتى الفيلسوف الفرنسي <R. ديكارت> بنظرية لتفسير كيفية شعور الناس بالألم. فأي عقصة أو ضربة أو وخزة في رأيه تشد على حبل عصبي وظيفته أن يقرع جرس الإنذار بالألم في الدماغ. فإذا تصورنا أن قدما تعرضت للحرق مثلا، «انتقلت شرارات من نار بسرعة عبر الألياف العصبية لتصل إلى الدماغ».

ولم يكن «ديكارت» بعيدا بُعدا كبيرا عن الصحة. فالألم عادة يبدأ في المحيط، من الجلد أو في أي عضو خارج الجهاز (الجملة) العصبي المركزي (CNS) [المؤلف من الدماغ والنخاع الشوكي]. فإذا تعرضت إصبع قدمك للرض مثلا أو إذا لمست بالخطأ مدفأةً ساخنة، تأثرت خلايا عصبية خاصة تدعى **مستقبلات الألم** nociceptors وظيفتها التفاعل مع المحرضات المؤلمة كالحرارة المرتفعة أو الضغط الميكانيكي أو المركبات الكيميائية الناتجة من أذية أو التهاب.

ولكل خلية من مستقبلات الألم هذه «ذراعان»: الذراع (أو الفرع) الأولى وظيفتها كشف الإحساس، وتمتد إلى محيط الجسم حيث تعصّب بقعا صغيرة من النسج، والذراع الأخرى تمتد إلى **النخاع (الحبل) الشوكي** spinal cord (*انظر الإطار في الصفحة 32*). أما جسم **الخلية العصبية** neuron فيقبع في «عقدة عصبية» خارج العمود الفقري بين الفرعين (الذراعين). فإذا واجهت جزيئات كيميائية كاشفة على الفرع المحيطي عاملا مؤذيا في الجلد أو في أي عضو آخر، أحدثت موجة عصبية تسلك الفرع إلى الخلية العصبية في الوسط. ثم يعبر الفرع الآخر إلى منطقة في النخاع الشوكي تدعى **القرن الظهري** dorsal horn. وهناك تحرر الخلايا مستقبلات الألم جزيئات كيميائية أخرى مؤشرة تدعى **النواقل العصبية** neurotransmitters، وظيفتها تفعيل الخلايا العصبية في القرن الظهري، حيث تحثها على نقل رسالة التحذير هذه صعودا إلى الدماغ. ومع أن مستقبلات الألم كثيرا ما تُصوَّر على أنها الخلايا العصبية المستشعرة للألم(***)، فوظيفتها لا تتعدى الإعلام بوجود منبهات أو محرضات مؤذية. أما العضو الذي يترجم الإشارة على أنها ألم حقيقي ويجعلنا نصرخ «آخ» فهو في الواقع الدماغ.

ولا يمكن القول إن جميع أنواع الألم تدعو إلى القلق. فالألم الحاد الذي يرافق أذية نسيجية بسيطة مثل **الوثي** sprain أو **السحج** abrasion يعتبر وقائيا، لأنه يدعو المصاب إلى تفادي أذية أكبر. هذا النوع من الألم عادة ما يكون مؤقتا ويزول بعد فترة.

أما الألم الذي يسبب القلق والإزعاج للمرضى والأطباء، فهو الألم الذي يبقى مستمرا ويعصى على المعالجة. وغالبا ما يكون سبب المشكلة استمرار الأذية أو الالتهاب الذي أحدث انزعاج المريض في الأساس: فأوجاع التهاب المفاصل مثلا

(*) TOWARD BETTER PAIN CONTROL
(**) Particles of Fire
(***) pain-sensing neurons

سببها استمرار عملية الالتهاب، والآلام السرطان المتقدم المعندة تحصل من تواصل تخرب النسج المصابة والتهابها.

وفي حالات أخرى ينتج الألم المستمر من تأذي الخلايا العصبية نفسها، مثلما يحصل عندما تتخرب خلايا الجهاز العصبي المركزي [الدماغ والنخاع الشوكي] بسبب **التصلب المتعدد** multiple sclerosis أو بسبب ضربة دماغية أو بسبب رض في النخاع الشوكي. كذلك يمكن حصول الألم المستمر من أذية الخلايا العصبية المحيطية، مثلما هي الحال في الذين يتعرضون لبتر في الحساسية قد تأخذ شكل ردود فعل مفرطة تجاه مصادر ألم عادية[1]، أو شكل تألم من عوامل غير ضارة عادة[2]، وفي الشكل الأخير يمكن حتى لاحتكاك الثياب العادي مع الجلد، أو ثني أحد المفاصل، أن يتسبب في آلام غير محتملة للمريض.

وقد أدرك علماء الأحياء اليوم أن هذه الحساسية المفرطة تنجم عن تغيرات عضوية في الخلايا العصبية على مستوى الجزيئات، ففي محيط الجسم مثلا قد تؤهب بعض الجزيئات المحرضة على الالتهاب في مستقبلات الألم الكاشفة للأذيات، قد تؤهبها

ومهما تكن الآلية المسؤولة، فقد أصبح معلوما أن الألم المستمر يمكن أن يؤدي إلى زيادة التحسس، ومن ثم إلى تفاقم الشعور بالألم وطول بقائه؛ لذلك صار موضوع تلطيف ردود الفعل المفرطة تجاه المنبهات من أهم ما يفكر فيه الإخصائيون وهم يبحثون عن علاجات مضادة للألم جديدة. وعلى المرضى في هذه الأثناء أن يدركوا أنهم غير ملزمين بتحمل الآلام المعندة، وأن يسعوا إلى معالجتها حثيثا لدى الإخصائيين كي يتفادوا مشكلة فرط الحساسية.

على المرضى أن يدركوا أنهم غير ملزمين بتحمل الآلام المعندة وأن تلك الآلام يلزمها معالجة جذرية.

الساق ويعانون ما يسمى **ألم الطرف الشبحي** phantom limb pain، أو الذين يشكون من آلام جلدية حارقة تبقى مستمرة عدة سنوات بعد انتهاء إصابتهم بنوبة من **عدوى (خمج) الحلأ** herpes infection. جميع هؤلاء يعانون آلاما ذات منشأ عصبي، وهنا لا يكون الألم المستمر كناية عن تواصل أذية أو مرض في أحد الأعضاء، إنما يكون علة في الجهاز العصبي نفسه تستوجب عناية طبيب مختص بعلاج الألم.

آلام لا تنتهي(*)

ولعل المخرج المشترك الأعظم لكثير من الآلام المعندة على المعالجة هو حساسية المريض غير الطبيعية للمنبهات. وهذه لأن تبالغ في التفاعل مع تلك المنبهات، بل قد تجعلها ترسل إشارات للدماغ من دون وجود أي مؤثر بيئي.

كذلك قد تنجم حساسية للمنبهات من تبدلات تحصل في الجهاز العصبي المركزي تولد فعالية مفرطة في الطرق العصبية الناقلة للألم. هذه التبدلات التي يمكن أن تستمر فترات طويلة، قد تشمل عرض أعداد متزايدة من المستقبلات التي تستجيب للنواقل العصبية التي تحررها مستقبلات الألم، وقد تشمل حتى إعادة صياغة الاتصالات العصبية، أو فقدان فعالية الخلايا العصبية التي عادة ما تكبح إشارات الألم. وعندما تحصل التبدلات المؤدية إلى فرط الحساسية في الجهاز العصبي المركزي تدعو الحالة «حساسية مركزية».

لنبدأ من الأول(***)

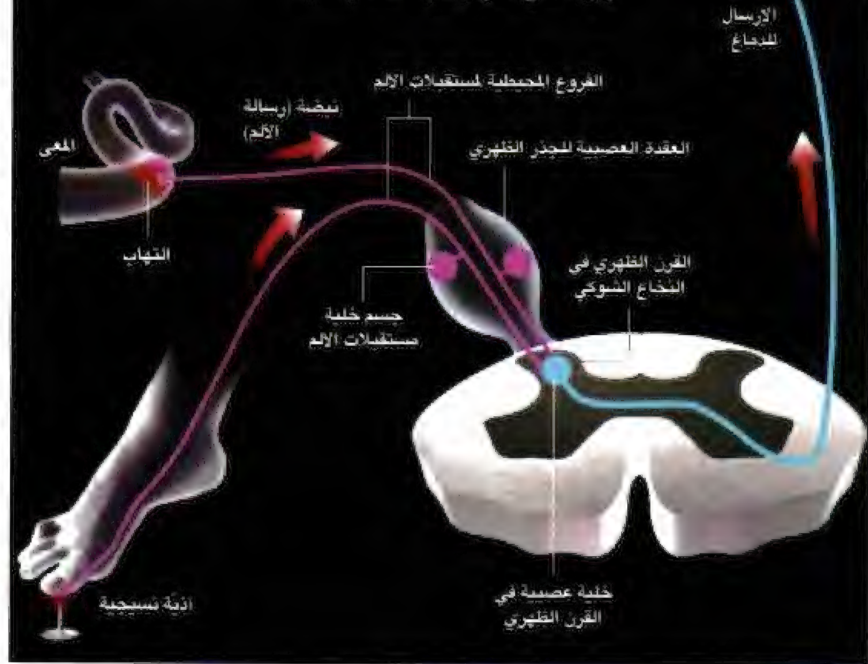
لقد توجه الإخصائيون في محاولاتهم اكتشاف أدوية جديدة مضادة للألم إلى المكان الذي تصدر عنه معظم الإشارات الألمية: محيط الجسم. فبعض الجزيئات المختصة التي تستخدمها مستقبلات الألم للكشف عن المنبهات المؤذية يندر أن توجد في غير هذه المناطق؛ لذلك إن تمكنا من إعاقة عمل هذه الجزيئات، أغلقنا الطريق على إشارات الألم من دون تعطيل عمل وظائف الجسم الفيزيولوجية الأخرى، أي من دون تسبيب مضاعفات جانبية غير حميدة.

ومعظم علاجات الألم الشائعة اليوم - كالأسبرين ومضادات الالتهاب اللاستيرويدية (NSAID) الأخرى - تؤدي وظيفتها السحرية في المحيط، فإذا أوذيت ناحية من محيط الجسم، ضخت خلايا النسج المتأذية مركبات كيميائية تدعى بروستاگلاندينات prostaglandins، تعمل على خفض عتبة ردود الفعل عند فروع مستقبلات الألم التي تستشعر حس

نظرة إجمالية/ تخفيف الألم(**)

- **هناك خلايا عصبية مخصصة (تدعى مستقبلات الألم) تستجيب للمنبهات المؤذية، وهذه الخلايا تنقل رسالة الألم إلى خلايا عصبية أخرى في النخاع الشوكي، ترسل بدورها الإشارة إلى الدماغ.**
- **تمتلك مستقبلات الألم وخلايا عصبية أخرى في دارات الألم جزيئات خاصة للكشف عن المنبهات المسببة للألم، وهذه الجزيئات يمكن أن تستخدم أهدافا لعقاقير قيد التطوير مهمتها تخفيف الألم بآثار جانبية أقل من تلك التي تحصل من العقاقير المتوافرة حاليا.**

(*) Pain without End
(**) Overview/ Easing Pain
(***) Start at the Beginning
(1) hyperalagesia
(2) allodynia



الانزعاج. وما يفعله الأسپرين والمركبات NSAID هو كبت لفعّالية مجموعة من الإنزيمات تدعى **سايكلو أكسجينازات** cyclooxygenases تستخدمها الخلايا لتوليد البروستاگلاندينات. وهذه العقاقير التي تباع **من دون وصفة** over-the-counter تسكّن أوجاع وآلام الكثيرين كل يوم، لكنها تثبط توليد البروستاگلاندينات في نواح أخرى من الجسم، وهذا يؤدي في كثير من الأحيان إلى آثار جانبية غير حميدة، مثل آلام المعدة والإسهالات والقرحة الهضمية. وهي مضاعفات كثيرا ما تمنع استخدام هذه العقاقير لفترات طويلة، كما تحد من حجم الجرعات التي تعطى منها.

ومن أجل تخفيف هذه المضاعفات الهضمية اخترعت شركات الأدوية مجموعة من العقاقير التي تستهدف الإنزيم سايكلو أكسجيناز 2 (COX-2)، ولما كان هذا الإنزيم لا يعمل عادة في المعدة أو في المعي(1)، فإن تثبيطه من شأنه ألا يسبب الخلل الوظيفي الذي تسببه العقاقير NSAID الشائعة التداول. ولو أنه غير مثبت حتى الآن كونها ألطف من هذه الأخيرة على غشاء المعدة. إلا أن العقاقير الجديدة ثبت أن ثمة مشكلات خاصة بها. فالعقار روفيكوكسيب Rofecoxib المعروف تجاريا باسم ڤيوكس Vioxx ـ وهو من مثبطات الإنزيم COX-2 التي شاع وصفها لآلام التهاب المفاصل ـ سُحب من الأسواق عندما تبين أن استخدامه يترافق مع ازدياد احتمال حدوث السكتات القلبية والدماغية. وتدرس حاليا احتمالات الضرر في استعمال مثبطات أخرى للإنزيم COX-2.

عليك بالأطعمة الحرّيفة(**)

لقد أدى اكتشاف أهداف علاجية توجد على مستقبلات الألم لوحدها، إلى تصنيع أدوية تعمل على إزالة الألم بشكل انتقائي. ولعل **مستقبلة الكاپسايسين** capsaicin هي الأكثر إثارة من بين هذه الأهداف: إذ إن هذه القناة الأيونية الموجودة في غشاء كثير من خلايا مستقبلات الألم لا تتجاوب فقط مع المادة كاپسايسين، وهي المادة الفعالة في الفليفلة الحارّة (الحادّة)، وإنما للحرارة الشديدة **وللپروتونات** protons، وهي أيونات (شوارد) الهدروجين التي تجعل المأكولات حامضة. ومن المعروف أن الپروتونات توجد في النسج الالتهابية بكثرة. فبحضور هذه المركبات الكيميائية أو بوجود حرارة مرتفعة فوق 43 درجة مئوية، تسمح هذه القناة بمرور أيونات الصوديوم والكالسيوم بكثرة عبر غشاء الخلية إلى مستقبلات الألم. وهذا يحفزها على توليد إشارة تترجم إلى حس بالحرق تسببه الحرارة أو الالتهاب أو الأطعمة الحرّيفة (الحادة المذاق).

لذلك من المتوقع أن المواد التي تكبح مستقبلات كاپسايسين من شأنها أن تُخمد ألم الالتهاب. وبالفعل ثبت في مختبر الحيوانات أن تلك المواد المضادة يمكنها أن تُسكّن الآلام الشديدة الناتجة من البيئة الحامضة التي تحيط بالأورام المتقدمة التي انتقلت إلى العظام وخربتها. ولا عجب إذًا أن شركات أدوية كثيرة تتنافس اليوم على اختراع مضادات لمستقبلات كاپسايسين.

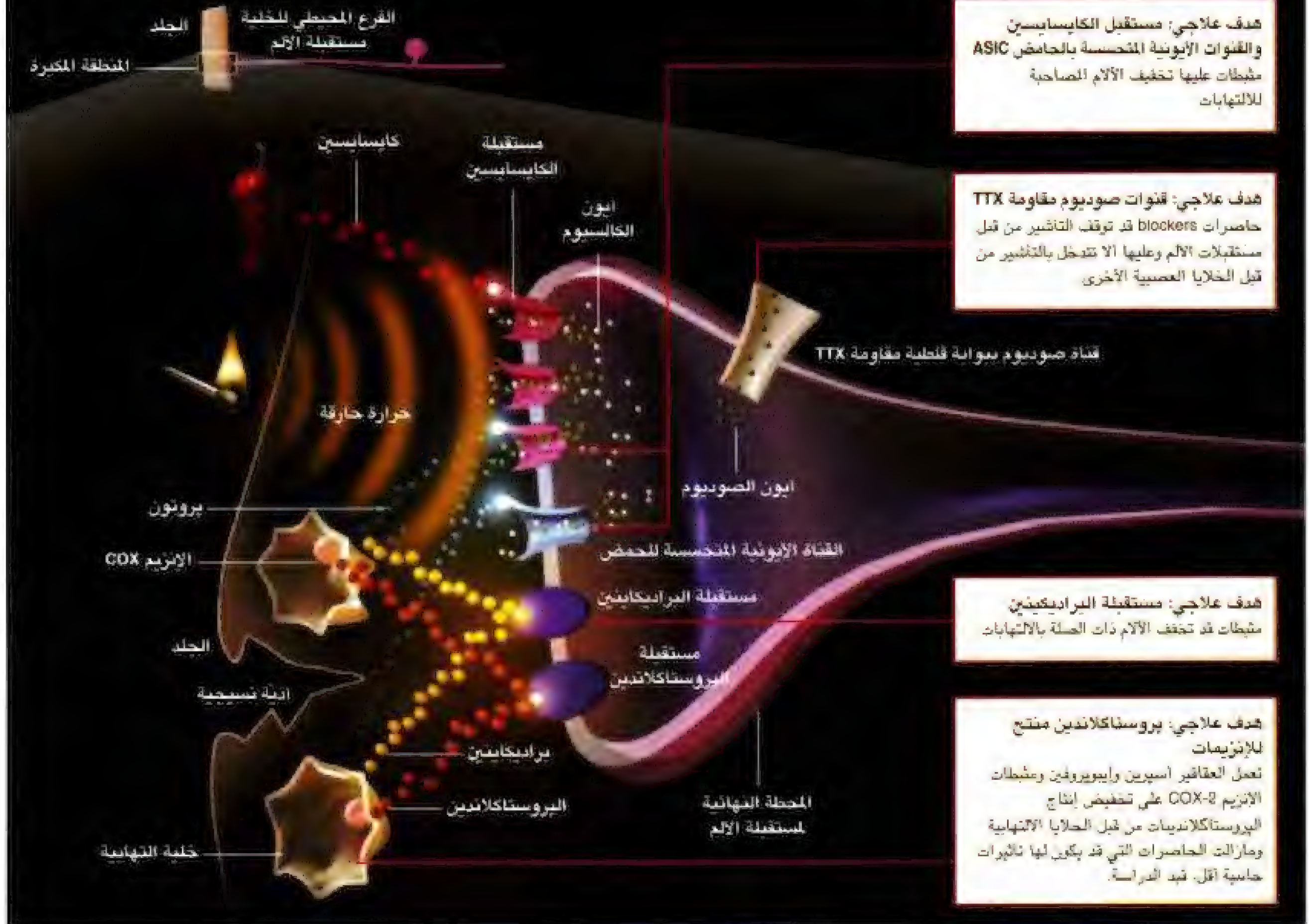
ولا تقتصر معالجة المستقبلات على هذا الأمر، فقد تبين ـ مما يثير الدهشة ـ أن إثارة مستقبلات كاپسايسين عمدا بدلا من كبحها يمكن في بعض الحالات أن يخفف الألم. ولذلك أخذ الأطباء يصفون مراهم تحوي المادة كاپسايسين للراحة من الألم الحكاك، أو إحساسات اللسع التي ترافق التئام الجروح، أو تلف الأعصاب الناتج من داء السكري، أو الحلأ (الهربس) أو **عدوى الأيدز** HIV infection. ومع أن سبب الاستفادة من هذه المراهم غير واضح حتى الآن، فالتعرض الطويل لجرعات خفيفة من الكاپسايسين يمكن أن يثبط حساسية

(*) Feeling The Pain
(**) Send in the Salsa
(1) ج: أمعاء.

أهداف علاجية في محيط الجسم(*)

إن الفروع الصغيرة لخلايا مستقبلات الألم التي تعصب الجلد والأعضاء الداخلية تمتلك جزيئات مختصة (مستقبلات) يمكنها كشف المنبهات المؤذية. هذه المنبهات تشمل مادة الكابسايسين الكيميائية في الفليفلة الحادة، والحرارة المرتفعة، والمواد التي تحررها خلايا الالتهاب التي تستجيب للأذية.

فإذا تعرفت الكواشف هذه المنبهات، دفعت أيونات الصوديوم والكالسيوم إلى داخل الخلايا. وهذا يُفعّل مستقبلات أخرى تحرض بدورها الخلايا مستقبلات الألم على إرسال إشارات الألم وتجعلها تستجيب بشكل مفرط لمنبهات عادية وغير مؤذية. كذلك يحتاج استمرار تحرك الإشارة إلى تفعيل القنوات الأيونية؛ لذلك يعتبر تثبيط فعالية الجزيئات الكاشفة أو القنوات الأيونية إجراء علاجيا كما هو مبين في المربعات. وقد بينا فقط بعض الأهداف العلاجية التي تجرب حاليا لإبقاء الرسم واضحا.



المستقبلات، ويجعلها أقل استجابة للمنبهات العادية، أو أنه يستنفد النواقل العصبية التي تحررها الخلايا مستقبلات الألم.

لنعترض القنوات الأخرى(**)

وهناك نوع آخر من الجزيئات الموجودة على النهايات المحيطية للخلايا مستقبلات الألم أخذت تثير اهتمام الإخصائيين كهدف علاجي فجميع الخلايا العصبية تحوي قنوات يعبر منها أيون الصوديوم. تفتح استجابة لتغيرات في الفلطية (القوة المحركة الكهربائية) voltage عبر غشاء الخلية، وهذا يولد نبضات تنقل رسائل بين خلية عصبية وأخرى مجاورة لها. وباستطاعة المخدرات الموضعية التي تُهمد الحركة عبر قنوات الصوديوم هذه مؤقتا أن تعالج أنواعا مختلفة من الألم، وبخاصة تلك التي تحدث بعد مراجعة طبيب الأسنان. إلا أن هذه المخدرات يجب أن تطبق موضعيا في مكان الانزعاج (فتثبيط قنوات الصوديوم في سائر الجهاز العصبي قد يؤدي إلى الوفاة).

لكن الخلايا العصبية المختصة باستشعار الألم تحوي نوعا فرعيا من قنوات الصوديوم، يعرف بالنمط المقاوم TTX(***)، لا يوجد في الجهاز العصبي المركزي. ويأمل الباحثون لذلك أن يستطيعوا استخدام أدوية تعترض هذه القنوات الفرعية جهازيا (عن طريق الجسم كله) ومن دون مضاعفات تُذكر: ثم إنه وُجد من بعض الدراسات أن مثل هذه الأدوية بإمكانها إخماد الفعالية

(*) Drug Targets in The Periphery
(**) Block Other Channels
(***) TTX-resistant type

المفرطة وغير المستحبة للأعصاب المحيطية التي تعرضت للأذى. وبذلك يمكنها تلطيف الآلام ذات المنشأ العصبي. وللأسف، لم تستطع الصناعة الدوائية حتى الآن تطوير مثبطات انتقائية لمثل هذه القنوات الفرعية، ويردُّ ذلك جزئيا إلى أنها تشبه إلى حد كبير قنوات الصوديوم المستجيبة لـTTX والموجودة بكثرة في الجهاز العصبي كله.

إلا أنه يمكن إزالة هذه القنوات الفرعية انتقائيا بطريقة جديدة تدعى **التداخل بالرنا** RNA interference. وتعتمد هذه الطريقة على إدخال جزيئات دقيقة في كائن حي تدعى **جزيئات الرنا المتداخلة الصغيرة** small interfering RNAs (siRNAs). وهذه الجزيئات تمنع إنتاج أحد البروتينات غير المرغوب فيه، قادرا على تخريب مستقبلة البراديكاينين bradykinin، وهو بروتين صغير (ببتيد) يُنتج عند التهاب أحد نسج المحيط، فمن المعروف أن البراديكاينين ينبه مستقبلات الألم بشدة. وإذا وجدت **ضادّة** antagonist تعيق عمل مستقبلاته، فلابد لها أن تحجب تلك المستقبلات من تفعيل الخلايا مستقبلات الألم. إلا أن هذه الضادّة لن تمنع الخلايا العصبية من تعرّف جزيئات أخرى محرِّضة للألم تولدها الأذية أو الالتهاب، ومن الاستجابة لها - جزيئات مثل البروتونات والبروستاگلاندينات، وبروتين آخر يدعى عامل نمو الأعصاب. كذلك قد لا نستطيع تلطيف الآلام التي تنقلها جميع البروتونات من إعاقة مستقبلات الكابسايسين لوحدها، يعترض نقل إشارات الألم لخلايا النخاع الشوكي العصبية. كذلك تجعل الأفيونات خلايا القرن الظهري (في النخاع الشوكي) أقل استجابة لإشارات الألم. ولأن هذه العقاقير تعمل على النخاع الشوكي يُتوقع نظريا أن تعالج جميع أنواع الألم، لكنها بالفعل تعطي أفضل النتائج في الآلام الناتجة من عمليات الالتهاب.

إلا أن هذه المستقبلات الأفيونية توجد - مع الأسف - على الخلايا العصبية في كل أنحاء الجسم، بما في ذلك الدماغ والجهاز الهضمي. وهذا الوجود المعمم هو سبب حصول أنواع عديدة من المضاعفات الجانبية عند استخدام الأفيونات، مثل الإمساك وإعاقة التنفس. وهذا يحدد

قد يستطيع الباحثون أن يطوروا علاجات نفسية أفضل لتغيير الإحساس بالألم.

بحثّ انحلال الجزيئات (الرناوات المرسالة)(1) التي تدير عملية تركيب البروتين. هذه الطريقة قيد الدراسة حاليا في الإنسان لعلاج بعض الحالات المرضية في شبكة العين، لكن الاستفادة من طريقة التداخل بالرنا في تصنيع أدوية تمنع الألم ستشكل تحديا صعبا للباحثين في الأغلب؛ فكما هي الحال بالمعالجة بالجينات، ستحتاج طريقة نقل جزيئات الرنا المتداخلة الصغيرة إلى استخدام ڤيروس (حمة راشحة)، وهذا مدعاة للقلق من ناحية السلامة. ولابد من الانتظار لمعرفة فيما إذا ستكون هذه الطريقة عملية في علاجها للألم، لكن إمكانية ذلك تبقى مثيرة للباحثين.

لنفترض أن شركات الأدوية استطاعت أن تطور علاجا سحريا للألم: أي مركبا يزيل فعالية أحد الجزيئات الناقلة للألم على الخلايا مستقبلات الألم على نحو فعال وانتقائي. فهل سيضمن هذا التداخل الراحة التامة من الآلام المعندة يا ترى؟ الجواب: ربما لا يفعل ذلك، لأن إغلاق مدخل واحد لطريق انتقال الشعور بالألم قد لا يكفي.

تصور - مثلا - أن هناك مركبا كيميائيا لأنه في بعض الحالات الخاصة تُنشِّط البروتونات مجموعة مستقلة من **الكواشف** detectors الموجودة على الخلايا مستقبلات الألم، تدعى **القنوات الأيونية المتحسِّسة بالحامض** acid-sensing ion channels (ASICs).

لنركز على النخاع الشوكي(*)

قد يكون أحد حلول هذه المشكلة التي تبدو من دون نهاية، أن يُعطى مزيج من الجزيئات المثبِّطة التي تستهدف عدة آليات لاستشعار الألم فورا. إلا أن طريقا آخر هو أن نستهدف جزيئات تعمل مركزيا، لحجب إمكانية جميع الخلايا مستقبلات الألم على نقل إشارات الألم إلى خلايا النخاع الشوكي العصبية - مهما كانت أنواع المنبهات التي أثارت هذه الخلايا في الأصل.

هذه الطريقة هي التي تعمل عند استخدام المورفين والأفيونات الأخرى، التي تترابط بالمستقبلات الأفيونية على نهايات الخلايا مستقبلات الألم المتصلة بالنخاع الشوكي: فبتفعيل المستقبلات الأفيونية هذه تمنع الأفيونات تَحرُّر النواقل العصبية، مما خيارات تلك العقاقير لدى الطبيب إذا أراد سلامة المريض. كما أن كثيرا من الأطباء لا يرغبون في وصف الأفيونات خوفا من الإدمان، علما أن الوقوع في الإدمان غير شائع عند من يتعاطون الأفيونات بهدف التخلص من الألم فقط. وللتخلص من بعض الآثار الجانبية كثيرا ما يلجأ الأطباء إلى حقن الأفيونات مباشرة في السائل المحيط بالنخاع الشوكي (داخل القراب). كما أن هذه العقاقير يمكن أن تحقن في العضل (للتخلص من الأوجاع التالية للعمليات الجراحية)، أو تدفع تدريجيا عن طريق مضخة وريدية (للتخلص من الآلام المزمنة).

ثم إن هناك بدائل للأفيونات. فالأدوية التي تعترض عمل قنوات الكالسيوم يمكن أن تمنع تحرر النواقل العصبية من نهايات الخلايا مستقبلات الألم في النخاع الشوكي. مثالان على ذلك هما دواء گاباپنتين Gabapentin (نيوروتين Neurotin) المضاد للاختلاج، الذي يُعتقد أنه يريح من أشكال من الألم بتفاعله مع وحدات فرعية لبعض

(*) Focus on the Cord

(1) أو الساعية messengers RNA

أهداف علاجية في النخاع الشوكي(*)



قنوات الكالسيوم: ودواء جديد نوعا ما يدعى زيكونوتايد Ziconotide (بريالت Prialt) مستخرج من سم حلزون يعيش في المحيط الهادي، يثبّط نوعا مختلفا من قنوات الكالسيوم يدعى **النوع N** N-type.

وكما هي الحال في مستقبلات الأفيونات، توجد قنوات الكالسيوم من النوع N في جميع أنحاء الجهاز العصبي. فإذا أُعطي زيكونوتايد جهازيا أدى ذلك إلى هبوط الضغط الشرياني هبوطا سريعا. لذلك يعطى هذا الدواء داخل القراب (في السائل المحيط بالنخاع الشوكي). ولكن مع أن هذا السم الحيواني يحجب الألم، فمفعوله داخل الجهاز العصبي المركزي يحدث آثارا جانبية غير مستحبة، كالدوخة والغثيان وآلام الرأس والتشوش الذهني، لذلك يعطى الزيكونوتايد خاصة للمصابين بمراحل متقدمة من السرطان الذين لا يستفيدون من أية وسيلة علاجية أخرى [انظر «نيهان مسكن للألم»، **العلوم**، العددان 4/3 (2006)، ص 72].

وتُطبّق تجارب سريرية مؤخرا على عقاقير تعمل على مستقبلات المواد الشبيهة بالحشيش والتي تنقل آثار **المرهوانة**(1) marijuana ـ والظاهر أن هذه المواد تخفف الألم بعدة طرق، منها اعتراض نقل الإشارات بين خلايا مستقبلات الألم والخلايا المستهدفة في النخاع الشوكي، ومنها إضعاف فعالية الخلايا الالتهابية.

لنغلق الفجوات(**)

يركز بعض الباحثين على منع خلايا النخاع الشوكي العصبية من الاستجابة للنواقل العصبية التي تحررها الخلايا مستقبلات الألم ـ وبخاصة **الحمض الأميني كلوتامات** glutamate amino acid الذي يعد الوسيلة الأساسية لنقل إشارة الألم. وينشط الكلوتامات مستقبلات مختلفة في القرن الظهري للنخاع الشوكي، وتشترك الزمرة NMDA (الزمرة النمداوية) من هذه المستقبلات في تحسس الألم المركزي. وهذا يجعلها هدفا معقولا للعقاقير الجديدة المضادة للألم.

ولما كانت كل خلية عصبية في الجسم تحوي نوعا أو آخر من المستقبلات NMDA، فإن تثبيط جميع هذه الأنواع مرة واحدة لابد أن يؤدي إلى آثار جانبية كارثية، مثل فقدان الذاكرة والاختلاجات المعممة والشلل. ولتلافي مثل ردود الفعل

(*) Drug Targets in The Spinal Cord
(**) Batten Down the Hatches
(1) أو الرجوانة

تطوير محاربين يتصدون للآلام(*)

تدرج في هذا الجدول بعض المركبات المضادة للألم التي تعمل بآليات جديدة والتي تجرب حاليا على الإنسان، وقد حذفنا منها لذلك الأصناف الجديدة من الزمر الصيدلانية المعروفة والمجربة كالأفيونات وحاصرات الإنزيمات COX. ومن المعروف أن التجارب البشرية تطبق على مراحل متدرجة في التطور، ففي المرحلة I (الأولى) يكون التركيز على سلامة العلاج، وتشمل المرحلة II أولى التجارب التي تهدف إلى إثبات فعالية العلاج؛ أما المرحلة III فتختص بتجارب أوسع وأشمل.

المركب (الشركة الصانعة)	طريقة العمل	مرحلة التجريب	الشركات التي تدرس مركبات مشابهة
(Amgen) AMG-517	يحجب مستقبلة الكابسايسين	I	GlaxoSmithKline, Neurogen
(Evotec) EVT-101	يحجب المستقبلات NMDA التي تحمل الوحدة الجزيئية NR2B	I	Roche, Merck & Co.
(Sanofi-Aventis) Icatibant	يحجب مستقبلة البراديكاينين	II	Merck & Co.
(NeurogesX) NGX- 4010	ينبه (تنبيها مفرطا) مستقبلة الكابسايسين	III	
(Neuromed Pharmaceutials) NMED-160	يغلق قنوات الكالسيوم من النوع N	II	
(Newron Ph) Ralfinamide	يغلق قنوات الصوديوم	II	
(Rinat Neuroscience) RN624	يمنع عامل النمو العصبي من تنبيه مستقبلات الألم	II	Amgen
(Novartis) SAB- 378	يفعّل مستقبلة المواد الشبيهة بالحشيش	II	GW Ph., GlaxoSmithKline

هذه. يحاول الباحثون اليوم تقييد هذه المستقبلات بالتأثير في أنواعها الموجودة في القرن الظهري للنخاع الشوكي لا غير. وفي هذا المجال، استطاع الباحثون أن يتوصلوا إلى نتائج مشجعة من تجارب أجروها على الحيوان مستخدمين مركبات كيميائية تتحد مع شكل من أشكال هذه المستقبلات يحتوي على ما يسمى **الجزيء NR2B** NR2B subunit. فتبين ـ على سبيل المثال ـ أن الفئران التي حقن سائلها الشوكي مباشرة بالمثبط NR2B صارت أقل تحسسا للألم من تلك التي لم تحقن. كما أن هذا العقار استطاع أن يخفي التحسس من المؤثرات غير المؤلمة عادة في الفئران التي عُرضت لأذية عصبية.

كذلك يحرر عدد من الخلايا مستقبلات الألم النواقلَ العصبية الپپتيدية، مثل المادة P، والپپتيد المتعلق بجينة الكالسيتونين (CGPR). هذه الپپتيدات تفعّل الخلايا العصبية الناقلة للألم في النخاع الشوكي عن طريق تأثيرها في مستقبلات خاصة، لذا يتوقع للأدوية التي تحجب التفاعل مع هذه المستقبلات أن تكون فعّالة في تخفيف الألم. ومع الأسف لم يفلح حصار المستقبلة التي تستخدمها المادة P ـ مستقبلة النيوروكاينين 1 أو NK-1 ـ في التجارب السريرية للسيطرة على الألم.

وقد يرجع السبب إلى أن حصار ذلك المستقبل غير كاف بحد ذاته. ولا يعرف فيما إذا كان تثبيط فعالية الپپتيد CGPR في النخاع الشوكي سيفيد في التخلص من الألم. علما بأن الصناعة الدوائية تطور حاليا عوامل مضادة لتخفيف ويلات **الشقيقة** migraine بواسطة اعتراض تحرير الپپتيد CGRP في الأوعية الدموية الموجودة على سطح الدماغ.

لنقضِ على حامل الرسالة(**)

إذا فشلت جميع المساعي لتعديل إبلاغ إشارة الألم، فيمكن لنا أن نفكر في التخلص من المرسال؛ إلا أن قطع أعصاب الخلايا مستقبلات الألم كثيرا ما يعود على المريض بالوبال، لأنه ـ كما رأينا ـ قد تولِّد الأذية العصبية آلاما أكثر عنادا وديمومة من الألم الأصلي. ولقد كان قطع الطرق (الحبال) العصبية في النخاع الشوكي التي توصل إشارات الألم إلى الدماغ شائعا في وقت من الأوقات بالماضي، إلا أن هذا الإجراء اليوم غدا محصورا في مرضى السرطان الذين يشكون من مراحل المرض الأخيرة عندما تنعدم الاستجابة لجميع أنواع المعالجات الأخرى. والمشكلة في الإجراء الأخير هي أن الجراح لا يستطيع إيقاف الشعور بالألم بشكل انتقائي

وقد يكون أحد الحلول الممكنة لهذه المشكلة ـ وهو حل يحظى اليوم باهتمام الباحثين نظرا إلى نجاحه في تجارب الحيوان ـ علاجا بالطب النووي (الذري) يطيح بزمرة من خلايا النخاع الشوكي العصبية التي تستقبل الإشارات من خلايا مستقبلات الألم. هذا العلاج القاتل للخلايا يجمع أحد السموم (ساپورين saporin) إلى المادة P. وفي المركب الناتج تتحد المادة P مع المستقبلات NK-1، وهذا يدخل المركب إلى بنية الجسم، ويسمح للساپورين بعدها أن يقتل الخلية العصبية. ولما كان المركب لا يدخل إلا الخلايا التي تحوي المستقبلات NK-1، فإن الباحثين يأملون أن تكون مضاعفاته الجانبية محدودة.

إلا أن التخلص من خلايا عصبية في النخاع الشوكي يجب أن يكون سهما أخيرا؛ فخلايا الجهاز العصبي المركزي لا تتكون من جديد بعد موتها، لذلك فالتبدلات التي تحدث بعد مثل هذه العلاجات - سواء كانت حميدة أو ضارة ـ هي تبدلات دائمة. ولا ينطبق نفس المبدأ على الجهاز العصبي المحيطي، لأن الألياف العصبية المبتورة يمكنها أن تولد نفسها من جديد

(*) Pain Fighters in Development
(**) Kill the Messenger?

لذلك يمكن للعلاجات التي تتلف الأجزاء الكاشفة للإشارات من فروع الخلايا مستقبلات الألم (كالجرعات العالية من كابسايسين)، يمكنها مثاليا إيقاف الألم، مع السماح لهذه الفروع العصبية بالنمو من جديد في النهاية بحيث تعود لكتلة النسيج خصائصها الطبيعية في كشف الألم.

وقد لا يكون استهداف الخلايا العصبية الطريقة الوحيدة للتغلب على الألم. فقد أظهرت الدراسات أن الخلايا الداعمة في النخاع الشوكي (**الدبقية** glia) تنشط عندما تحدث أذية للأعصاب المحيطية، فتهاجر إلى ناحية القرن الظهري المرتبط بالأعصاب المصابة. وهناك تفرز هذه الخلايا مجموعة من المركبات الكيميائية التي تحث نهايات الخلايا مستقبلات الألم على تحرير النواقل العصبية في النخاع الشوكي، وهذا يبقي إشارة الألم قائمة. كذلك تجعل بعض هذه المركبات (مثل عوامل النمو، وجزيئات تدعى **سايتوكاينات** cytokines) خلايا القرن الظهري بحالة تهيج مستمر، ويعتقد أن العقاقير التي تحجب هذه الفعالية الزائدة لا بد أن تحد من حساسية الألم المفرطة. ويعمل عدد من المجموعات الطبية حاليا للكشف عن الجزيئات المسؤولة عن تنشيط الخلايا العصبية الداعمة هذه إبان تأذي الأعصاب وإيجاد طرق لكبحها.

ومن المثير أن المواد التي تحررها الخلايا العصبية الداعمة وتسمى البروستاگلاندينات، تعزز الشعور بالألم باعتراض مستقبلات الحمض الأميني **گلايسين** glycine الموجود على خلايا القرن الظهري العصبية، وهو واحد من النواقل العصبية الناهية التي عادة ما تُهدئ هذه الخلايا. لذلك فالأدوية NSAIDs قد تفيد ليس فقط بمعاكسة إنتاج البروستاگلاندينات في محيط الجسم (وهي الطريقة المعروفة)، ولكن أيضا باعتراض الإنزيمات COX في الخلايا العصبية الداعمة. وهذا يعني أن إيصال مثبطات الإنزيمات COX إلى السائل الشوكي مباشرة قد يخفف كثيرا من الآثار الجانبية التي يسببها إعطاء هذه الأدوية جهازيا، ولكن عقارا يعزز فعالية مستقبلات الگلايسين يمكن أيضا أن يهمد من نقل رسالات الألم إلى الدماغ.

المسألة هي مسألة إدراك(1)

لقد ناقشنا في هذه المقالة مجموعة من التوجهات التجريبية لمعالجة الألم التي أثبتت جدواها في الدراسات على الحيوان. ويمكن القول إن أكثر هذه التوجهات إثارة هي التي لا تلحق تغيرا في الإحساسات الطبيعية، في حين تخفف من التحسس المفرط الذي يرافق الآلام العصبية والالتهابية الصعبة المعالجة، والتي لا يرافقها آثار جانبية مهمة. لكن إذا تساءلنا هل ستفيد هذه العلاجات مرضى الألم المعند فعلا وهل يمكن تطبيقها على جميع أنواع الألم، اضطررنا للاعتراف أن الجواب غير موجود حاليا.

ولعل واحدا من التوجهات التي لم تلق نصيبها الكافي من التجريب هو استخدام العلاجات السلوكية غير الدوائية في الآلام المزمنة ـ وبخاصة تلك التي ترافق حالات مرضية مثل **الأوجاع الليفية العضلية** fibromyalgia **ومتلازمة المعى الهيوجة** irritable bowel syndrome، والتي لم يثبت أن لها أسبابا عضوية حتى الآن. وقد بيّن الباحثون في جامعة ماكيل قبل نحو عشر سنوات مثلا أن **التنويم المغنطيسي** hypnosis باستطاعته تغيير فعالية الدماغ بحسب إدراك الشخص لحالة الألم. فبعد تنويم بعض المتطوعين، وغمس أيديهم بالماء الساخن، تمكن العلماء من الإيحاء لهم أن الماء الحار هو أكثر أو أقل إزعاجا مما كان عليه فعلا.

ووجد الباحثون باستخدام الومضان الطبقي البوزيتروني (PET) الذي يرقب فعالية الدماغ، أن قشرة الدماغ الحسية الحركية التي تتجاوب مع شدة التنبيه الفيزيائي، كانت فعالة بنفس الدرجة في كلتا الحالتين. في حين كانت منطقة أخرى من الدماغ (القشرة الحزامية) أكثر فعالية عندما اعتقد المتطوعون أن المنبه (الماء الحار) كان أكثر إزعاجا ـ وهذا يدل أن التنويم المغنطيسي غيّر طريقة إدراك المتطوعين لأحاسيس الألم. لذا يعتقد الباحثون أنهم إذا ازدادوا معرفة بالطريقة التي يعدل الدماغ بها تجربة الألم، فقد يستطيعون تطوير علاجات سلوكية جديدة لتخفيف إدراك الألم.

وما علينا إلا أن نأمل أن يوصلنا البحث الحثيث في آليات الشعور بالألم إلى طرق معالجة آمنة وناجعة. ■

(1) A Question of Perception

المؤلفان

Allan I. Basbaum - David Julius

كثيرا ما تعاونا في دراسة الآليات الجزيئية والخلوية المولّدة للآلام. حصل «باسباوم» على الدكتوراه في علم الأعصاب من جامعة بنسلفانيا، وهو حاليا رئيس قسم التشريح في جامعة كاليفورنيا بسان فرانسيسكو. أما «جوليس» فقد حصل على الدكتوراه في الكيمياء الحيوية من الجامعة U.C في بيركلي، وهو حاليا أستاذ الفارماكولوجيا الجزيئية والخلوية في الجامعة U C S F. وهما مستشاران لشركات تبحث عن علاجات للآلام.

مراجع للاستزادة

The Perception of Pain. A. I. Basbaum and T. Jessel in *Principles of Neural Science.* Edited by Eric R. Kandel et al. McGraw-Hill, 2000.

Molecular Mechanisms of Nociception. David Julius and Allan I. Basbaum in *Nature,* Vol. 413, pages 203–210; September 13, 2001.

Immune and Glial Cell Factors as Pain Mediators and Modulators. S. B. McMahon, W. B. Cafferty and F. Marchand in *Experimental Neurology,* Vol. 192, No. 2, pages 444–462; 2005.

Pain Collection in *Nature Reviews Neuroscience,* July 2005. Available online at www.nature.com/nrn/focus/pain

Emerging Strategies for the Treatment of Neuropathic Pain. Edited by James N. Campbell et al. IASP Press, 2006

Scientific American, June 2006

مجلة العلوم

المجلد 22 ـ العدد 10
أكتوبر (تشرين الأول) 2006

Majallat
AlOloom

مخاطر ازدياد حموضة مياه المحيطات(*)

<C. S.> دوني



في عام 1956، أشار كل من <R. ريفل> و <H. سويس> [وهما جيوكيميائيان يعملان في معهد سكريبس لعلم المحيطات في كاليفورنيا] إلى الحاجة إلى قياس كمية غاز **ثنائي أكسيد الكربون** (CO_2) في الهواء والمحيطات للوصول إلى «فهم أوضح للتأثيرات المناخية المحتملة الناجمة عن الإنتاج الصناعي الكبير المتوقع لثنائي أكسيد الكربون في الخمسين سنة القادمة.» وبتعبير آخر أرادا أن يفهما كيف يمكن أن تكون عليه الوضعية المنذرة بالكارثة في الوقت الحاضر؛ ولذلك يبدو مدهشا أن يحتاجا الآن إلى البرهنة على أهمية مثل هذه الملاحظات. ولكن في ذلك الوقت لم يعرف العلماء بالتأكيد فيما إذا كان ثنائي أكسيد الكربون المنطلق من عوادم الآلات ومداخن المعامل، يمكن أن يتراكم فعلا في الغلاف الجوي. وقد اعتقد البعض بقدرة مياه البحر على امتصاص جميع ثنائي أكسيد الكربون أو أن تمتصه نباتات اليابسة.

فقد رأى <ريفل> مع الراحل <D. C. كيلنك> [الباحث الشاب الذي استخدمه في هذا المشروع] أنّه كان عليهما أن يضعا المعدّات في أمكنة بعيدة عن المصادر المحلية لإطلاق ثنائي أكسيد الكربون وامتصاصه، التي ربّما تُعطي قياسات متغيرة بصورة مضلِّلة. وكان أحد الأمكنة الذي اختاراه بعيدا كل البعد عن النشاطات الصناعية والغطاء النباتي الذي يمكن أن يصل إليه أي شخص: وهو القطب الجنوبي. أمّا المكان الآخر فكان في محطة الأرصاد الجوية المقامة على قمة مونا لوا في جزيرة هاواي.

استمر الرصد في مونا لوا من عام 1958 حتى الوقت الحاضر (باستثناء انقطاع واحد قصير). ولأن موقع هاواي ليس بعيدا كموقع القطب الجنوبي، فهو يُري ارتفاعا وهبوطا حادّين في مستويات ثنائي أكسيد الكربون متوافقة مع تغيّر الفصول في نصف الكرة الشمالي. إلا أنه في نهاية كل سنة يصبح تركيز هذا الغاز الحابس للحرارة أعلى ممّا كان عليه قبل 12 شهرا. وهكذا لم يمض زمن طويل على المجتمع العلمي ليدرك أنّ <ريفل> كان مصيبا ـ فمعظم ثنائي أكسيد الكربون المنطلق إلى الغلاف الجوي مقدّر له أن يبقى هناك. كما أنّ حساباته كانت صحيحة عندما أوضح أنّ جزءا مهما من هذا الغاز ينتهي في البحر. لقد كان واضحا لدى <ريفل> منذ مدة طويلة أنّ الجزء الذي انتهى في البحر سيغيّر كيميائية مياه البحر تغييرا جوهريا. وبخلاف بعض مظاهر التغيّر المناخي، فإنّ حقيقة هذا التأثير ـ وهو بصورة أساسية ازدياد حموضة مياه المحيطات ـ لم تُناقش بصورة جدية، مع أنّ تأثيراتها الكاملة قد بدأ كشفها حاليا.

كم هو غير طبيعي؟(***)

سجلّ نصف القرن الذي قدّمه <كيلنك> قيّم للغاية. غير أنّ مدته كانت قصيرة جدا لوضع الحالة الراهنة في سياقها. ومع ذلك استطاع العلماء الحصول على عرض أطول مدةً وذلك بقياس

How Unnatural? (***)
THE DANGERS OF OCEAN ACIDIFICATION (*)

يدخل الكثير من غاز ثنائي أكسيد الكربون المنبعث من احتراق الوقود الأحفوري في المحيطات، حيث يغيّر التوازن الحمضي لمياه البحر. وقد يكون تأثير هذا التغير في الحياة البحرية كبيرا جدا.



تتعرَّض الشعاب المرجانية ـ والتنوُّع البيولوجي (الحيوي) الرائع الذي تعيله ـ لهجوم قوي متعدد، يشمل التعرُّض لموادّ كيميائية سامة وللتخريب فيزيائي مباشر. وربما كان التهديد الأعظم والمعروف بدرجة أقل هو تغير كيمياء مياه المحيطات الذي يسببه احتراق الوقود الأحفوري. ففي الوقت الحاضر، يدخل إلى مياه المحيطات ثلث كمية ثنائي أكسيد الكربون (CO_2) المنطلق من عملية الحرق هذه خافضا بذلك الرقم الهدروجيني pH لمياهها القلوية الطبيعية. وهذا الانحراف نحو ظروف أكثر حمضية يضعف قدرة المرجانيات (والكثير من الكائنات الحية البحرية الأخرى) على النمو.

الفقاعات الهوائية المحبوسة في لباب الجليد. فقد توصلوا من هذا الأرشيف الطبيعي إلى أن تركيز ثنائي أكسيد الكربون في الغلاف الجوي كان ثابتا تقريبا لعدة آلاف من السنين وبعدها بدأ بالزيادة بسرعة مع بداية عصر التصنيع في القرن التاسع عشر. إنّ نسبة هذا الغاز في الوقت الحاضر أعلى بنحو 30% عما كانت عليه قبل عدة مئات من السنين، ومن المتوقّع أن تصبح ضعفي أو ثلاثة أضعاف مستواها السابق في نهاية هذا القرن.

يأتي المد المتنامي من الكربون في جزئه الأكبر من احتراق الوقود الأحفوري: الفحم الحجري والنفط والغاز الطبيعي (تضيف صناعة الأسمنت واحتراق الغابات المدارية بعضا منه أيضا. وللتبسيط دعنا نصرف النظر عن هذا الرقم الثانوي من أجل الوضوح) وبخلاف مكونات الكائنات الحية، لا يحوي الوقود الأحفوري ـ أو يحوي القليل من ـ الشكلَ المشعَّ من الكربون، أي من نظير الكربون 14 الذي يتألّف من ثمانية نيوترونات في نواته عوضا عن ستة نيوترونات في الكربون العادي. كما أن في الوقود الأحفوري نسبة فريدة من نظيري الكربون المستقرين (الكربون 12 والكربون 13)؛ ومن ثم فإن احتراق الوقود الأحفوري سيترك بصمة نظيرية متميِّزة في الغلاف الجوي. وهكذا لا يمكن لأحد أن يتساءل من أين تأتي الزيادة المتنامية من ثنائي أكسيد الكربون.

يمكن أن تتغيَّر معدَّلات الامتصاص. وفي وقتنا الحاضر فإنّ نحوا من 40% من ثنائي أكسيد الكربون المنبعث من الوقود الأحفوري يبقى في الغلاف الجوي؛ أمّا الباقي فتمتصه نباتات اليابسة أو مياه المحيطات، بنسب متساوية تقريبا. إنّ حقن كربون الوقود الأحفوري في مياه البحر لا يكوِّن حاليا إلا إضافة صغيرة نسبيا إلى المحيط الذي هو مستودع ضخم لهذا العنصر الطبيعي؛ ولذلك يتطلّب تحرّي الامتصاص وتحديد كميته قياسات دقيقة دقّة واحد في الألف. ونظرا إلى أن كميات الكربون تتغيّر من مكان إلى آخر، فإنّ العمل يحتاج أيضا إلى الموارد والمثابرة لمسح تركيزات الكربون عبر العالم. لقد قام علماء المحيطات بهذا العمل تماما في أواخر الثمانينات والتسعينات من القرن الماضي، كجزء من تقييم عالمي قامت به مجموعتا بحث عرفتا باسميهما المختصرين JGOFS (Joint Global Ocean Flux Study) و WOCE (World Ocean Circulation Experiment).

ومع ذلك لم تتمكّن تلك المسوح من التمييز في الكربون المقاس بين ما هو طبيعي وما هو مشتق من ثنائي أكسيد الكربون الذي طرحه الناس في الهواء. ولإنجاز هذا العمل قام في عام 1996

«... كروير» [الذي يعمل حاليا في جامعة كاليفورنيا، لوس أنجلوس] مع اثنين من زملائه، بتطوير تقنية جديدة. إنّ تطبيق طريقة «كروير» على معلومات المجموعتين JGOFS و WOCE، هذا التمرين الذي انتهى في عام 2004، يوحي بأنّ المحيطات امتصت تماما نصف الكربون الأحفوري المنطلق إلى الغلاف الجوي منذ بداية الثورة الصناعية.

والطريقة الأخرى لتوثيق هذه العملية هي إجراء قياسات متكررة للكربون في الجزء نفسه من المحيط. ويجب الحذر في تمييز الكربون الأحفوري من المصادر البيولوجية المختلفة لعنصر الكربون في مياه البحر. وتحتاج الملاحظات إلى عقد من الزمن أو أكثر للكشف عن الاتجاه الكلي الناتج من حرق الوقود الأحفوري مقابل خلفية التغيّرات الطبيعية. لقد قمت في العام الماضي (2005) مع

منذ بداية الثورة الصناعية، امتصت المحيطات بصورة كاملة نصف كمية الكربون الأحفوري المنطلقة في الغلاف الجوي.

«R. فانْيْنكوف» [من مختبر National Oceanic and Atmospheric Administration's Atlantic Oceanographic and Meteorological Laboratory] بقيادة بعثة بحث لإجراء تجربة مثل هذه تماما.

لقد أمضينا شهرين تقريبا مع فريق مكون من 31 عالما وفنيا وطالبا على متن مركب لأخذ العينات من أجل دراسة الخواص الكيميائية والفيزيائية لجنوب غرب المحيط الأطلسي، بدءا من سطحه إلى قاعه ومن القطب الجنوبي إلى خط الاستواء، وهي الشريحة نفسها من المحيط التي قمت بقياسها مع علماء آخرين في عام 1989 عندما كنت طالب دراسات عليا.

وعندما قارنا ملاحظاتنا التي أجريناها في عام 2005 بتلك التي أجريت قبل 16 سنة، وجدنا أنّ تركيز الكربون في مئات الأمتار القليلة العليا من المحيط الأطلسي في الوقت الحاضر أعلى ممّا كانت عليه في الماضي القريب، وهو متوافق مع فكرة أنّ البحر يمتص ثنائي أكسيد الكربون الجوي. وقد وجد علماء بحار آخرون اتجاهات مشابهة في المحيطين الهادئ والهندي. فما هو بالضبط ما يُنذر به هذا التغيّر في البيئة البحرية؟

نظرة إجمالية/ثنائي أكسيد الكربون في المحيطات(*)

- في الوقت الحاضر، ينتهي في المحيطات نحو ثلث كمية ثنائي أكسيد الكربون (CO_2) المنطلق من احتراق الوقود الأحفوري.
- يتكوّن حمض الكربون من ثنائي أكسيد الكربون الممتص في مياه البحر مخفضا بذلك مستوى الرقم الهدروجيني pH السائد (الذي هو قليل القلوية) ومغيّرا توازن أيونات الكربونات والبيكربونات.
- إنّ الانزياح نحو الحموضة والتغيّرات في كيميائية مياه المحيطات التي تنشأ، تجعل بناء المخلوقات البحرية لأجزائها الصلبة من كربونات الكالسيوم أكثر صعوبة. وهكذا فإن انخفاض الرقم الهدروجيني يهدّد مجموعة من الكائنات الحية البحرية تتضمّن المرجانيات التي هي أحد مواطن الكائنات الأغنى على الكرة الأرضية.
- وخلال قرن من الزمن سيصبح سطح المحيط الجنوبي مؤذيا لأصداف القواقع (الحلزونيات) الصغيرة التي تشكل حلقة مهمة من حلقات سلسلة الغذاء البحري ضمن هذه المنطقة المرتفعة الإنتاج.

مراجعة لأوليات كيمياء المحيطات(**)

مع الأسف، يتطلّب تفسير هذه التغييرات في مياه المحيطات، مراجعة لبعض دروس كيمياء السنة الأولى الجامعية؛ ولكن الأمر ليس شاقا. يتحد ثنائي أكسيد الكربون (CO_2) مع الماء (H_2O) ليشكّل حمض الكربون الضعيف (H_2CO_3)، وهو الحمض نفسه الموجود في المشروبات الغازية الكربوناتية. وهو مثل جميع الحموض يطلق أيونات الهدروجين (H^+) في المحلول. ويُحرِّر أيضا أيونات البيكربونات (HCO_3^-) مع كمية أقل من أيونات الكربونات (CO_3^{2-}). ويبقى جزء صغير من حمض الكربون في المحلول من دون أن يتفكّك مع كمية صغيرة أيضا من ثنائي أكسيد الكربون. والخليط الناتج المؤلَّف من مركبات الكربون والأيونات هو إلى حد ما خليط معقّد.

والنتيجة البسيطة الوحيدة لكل هذا الذوبان والتفكّك هي زيادة في تركيز أيون الهدروجين، حيث يقدّر الكيميائيون عادة كميتها بمقياس الرقم الهدروجيني (pH) المعروف. إن انخفاض وحدة واحدة على هذا المقياس يتوافق مع زيادة مقدارها عشرة أضعاف في تركيز أيونات الهدروجين، وهذا يجعل الماء أكثر حمضية، في حين أن ارتفاعه وحدة واحدة نحو الأعلى يتوافق مع نقصان 10 أضعاف، وهذا يجعل الماء أكثر قلوية. والرقم الهدروجيني المتعادل (للماء النقي) هو 7. ويراوح الرقم الهدروجيني لماء البحر الأصلي ما بين 8 و 8.3، وهذا يعني أن مياه المحيطات إلى حدّ ما هي مياه قلوية بصورة طبيعية.

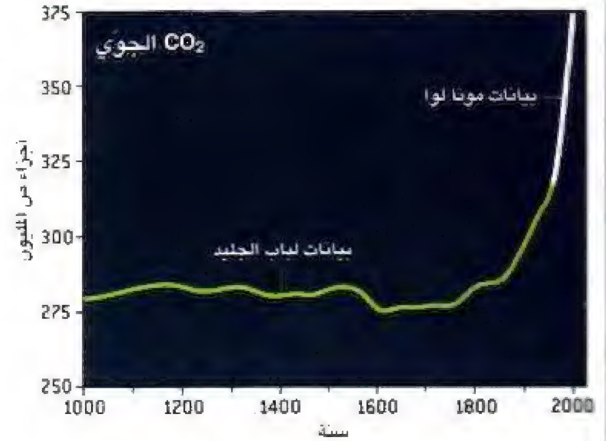
لقد تسبّب امتصاص ثنائي أكسيد الكربون في خفض الرقم الهدروجيني في المياه السطحية الحديثة قرابة 0.1 (أقل قلوية) ممّا كان عليه في الأزمنة ما قبل الصناعية. وما لم تُعدِّل الحضارة شهيتها للوقود الأحفوري في القريب العاجل وبطريقة فعّالة فإنّ الرقم الهدروجيني لمياه المحيط سوف يهبط 0.3 إضافية عند حلول عام 2100. وفي تنبؤ مقلق لمستقبل أكثر بعدا، يشير «K. كالديرا» [المتخصص في علم المحيطات بمعهد كارنيگي في واشنطن] إلى أنّ الرقم الهدروجيني للمحيطات سيصبح بعد قرون من الآن أخفض من أي وقت مضى خلال 300 مليون سنة الماضية.

وقد تبدو هذه التغيّرات في الرقم الهدروجيني صغيرة ولكنها تنذر بالخطر، إذ تشير التجارب الحديثة بوضوح إلى أنّ هذا التغيّر يُؤذي بعض أشكال الحياة البحرية وبصورة خاصة الكائنات التي تعتمد على وجود أيونات الكربونات لبناء أصدافها (أو الأجزاء الصلبة الأخرى) من كربونات الكالسيوم ($CaCO_3$).

في البداية، يبدو هذا «القلق» متناقضا. فعلى الرغم من جميع الاعتبارات، وإذا كان بعض ثنائي أكسيد الكربون الذي امتصته مياه البحر يتفكّك إلى أيونات كربونات، فيتوقع أن يوجد الكثير منها في هذه المياه، أكثر مما كان متاحا في غير هذه الظروف. ومع ذلك، يتصدّع هذا المنطق لأنه يهمل تأثير جميع أيونات الهدروجين التي تكون قد تشكّلت والتي تنزع إلى الاتحاد مع أيونات الكربونات مشكّلة أيونات بيكربونات

(*) Overview/ CO_2 in the Ocean
(**) Ocean Chemistry 101

ثنائي أكسيد الكربون (CO_2): من الغلاف الجوي إلى المحيط



ارتفع تركيز ثنائي أكسيد الكربون في الغلاف الجوي ارتفاعا كبيرا في القرن الماضي أو نحو ذلك. وقد تمّ توثيق هذا الارتفاع المقلق توثيقا جيدا (في اليمين) بضم تقنيتين اثنتين. أولاهما فحص فقاعات الهواء المنحبسة في جليد الجليديات (الثلاّجات) [*الجزء الأخضر من الخط البياني* الذي يبيّن معدل (متوسط) 75 سنة]. والتقنية الأخرى هي القياسات المباشرة للغلاف الجوي [*الجزء الأبيض من الخط البياني* الذي يعكس المعدّل السنوي المقاس في محطة الأرصاد الجوية المقامة في أعلى جبل مونا لوا على الجزيرة الكبيرة من هاواي].

إنّ هذا التركيز المتزايد لثنائي أكسيد الكربون، بهذا القدر، يمكن أن يكون أكبر بكثير فيما لو لم تمتص مياه البحر الكثير منه ـ وهي ظاهرة وثّقتها المسوح التي أجريت في المحيطات. وتبيّن المقاطع السفلى أمكنة وجود نحو نصف تدفّق الوقود الأحفوري في الوقت الحاضر ـ في الأجزاء العليا من محيطات العالم.

CO_2 المحيطات

تركيز الغاز CO_2 المنبثق من الوقود الأحفوري

70 ميكرومول/كغ — مرتفع

0 ميكرومول/كغ — منخفض

المحيط الهندي — خط الاستواء — المحيط الهندي — خط الطول 90 شرقا

بدون بيانات (قاع البحر/ جبل تحت بحري)

المحيط الأطلسي — المحيط الأطلسي — خط الاستواء — خط الطول 30 غربا

المحيط الهادىء — المحيط الهادىء — خط الاستواء — خط الطول 170 غربا

العمق (كيلومتر تحت مستوى البحر): 0، 1، 2، 3

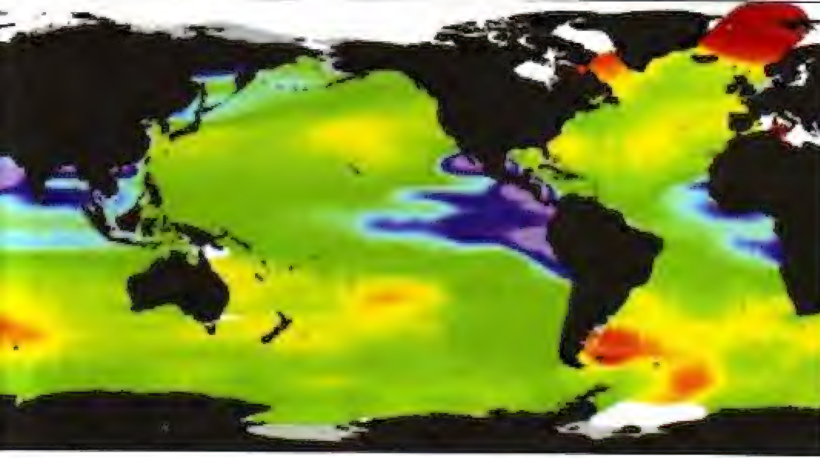
خط العرض: 60°S، 40°S، 20°S، 0، 20°N، 40°N، 60°N

والنتيجة النهائية هي إذًا نقصان في تركيز أيونات الكربونات.

ويكمن القلق من أنّ خفض الرقم الهدروجيني (وكذلك تركيز أيونات الكربونات التي من المتوقّع أن تنخفض إلى النصف في أثناء هذا القرن) سوف يعرقل قابلية بعض الكائنات الحية على تصنيع كربونات الكالسيوم إلى حدّ سيجعل نمو تلك الكائنات الحية صعبا. إنّ أكثر أشكال الحياة تأثّرا بذلك هو نوع من **العوالق النباتية** phytoplankton (كائنات نباتية طافية) تدعى حاملات **الكوكوليتات** coccolithophorids المغطاة بلويحات صغيرة من كربونات الكالسيوم وتوجد بشكل عام قريبة من سطح المحيطات (حيث تستخدم ضوء الشمس الوفير في عملية التركيب الضوئي). أمّا الأمثلة الأخرى المهمة فهي الكائنات الطافية التي تدعى **المنخربات** foraminifera (التي تنتمي إلى مجموعة **المتمورات** amoeba) و**البتروبودات** pteropods (قواقع بحرية صغيرة). وهذه المخلوقات الصغيرة تكوّن مصدرا غذائيا رئيسيا للأسماك والثدييات البحرية التي تتضمّن بعض أنواع الحيتان.

(*) CO₂: From Atmosphere To Ocean

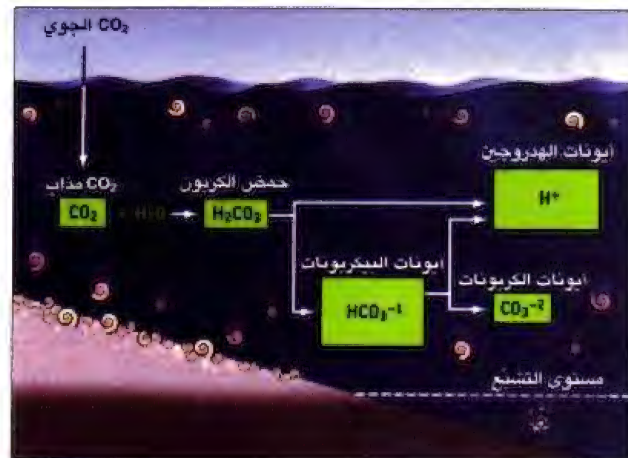
الحموضة المتغيرة في مياه المحيطات[*]



تكشف القياسات التي أجريت على الخمسين مترا العليا من مياه المحيطات، أنّ الرقم الهيدروجيني يتغيّر تغيّرا كبيرا من مكان لآخر ويتوقّع العلماء تناقص الرقم الهيدروجيني في مياه المحيطات في السنوات القادمة

تنشأ المناطق المائية ذات الرقم الهيدروجيني المنخفض نسبيا (يعني ذلك زيادة في الظروف الحمضية) على الأغلب من خلال صعود المياه العميقة طبيعيا. قد تكون هذه المناطق، مثل تلك التي تقع في الجزء الاستوائي الشرقي من المحيط الهادي، أمكنة جيدة للعلماء لدراسة التأثيرات المتوقع سيادتها على مساحات أوسع في المستقبل

ويخشى البيولوجيون أيضا ممّا قد يحدث للمرجانيات، التي على الرغم من مظهرها الذي يشبه النباتات، فإنها في الواقع مستعمرات من حيوانات صغيرة تنتمي إلى **شقائق البحر** sea anemones. فهي تتغذّى بترشيح العوالق البحرية (كائنات صغيرة طافية) من مياه البحر وتفرز هياكل من كربونات الكالسيوم التي تتراكم مع الزمن لتشكيل ما يسمى **الشعاب المرجانية** coral reefs التي تشكّل **النُّظُم البيئية** ecosystems الأكثر إنتاجا وتنوّعا من الناحية البيولوجية. وإضافة إلى ذلك تسهم **الطحالب المرجانية** coralline algae (طحالب تفرز أيضا كربونات الكالسيوم، وغالبا ما تشابه المرجانيات في المظهر) في «**كلسنة**» calcification الكثير من الشعاب المرجانية. فالرصيف (الشعب) الحاجزي الكبير Great Barrier Reef المقابل لشاطئ أستراليا مثلا ـ وهو البنية البيولوجية الأكبر في العالم ـ هو بكل بساطة تراكم من المرجانيات والطحالب المرجانية، جيلا بعد جيل.



يتحد ثنائي أكسيد الكربون الممتص من الهواء مع الماء لتشكيل حمض الكربون. يبقى جزء من هذا المركّب في مياه المحيطات ولكن معظمه ينفكك إلى أيونات الهدروجين المحمِّض وأيونات البيكربونات. كما أنّ بعض أيونات البيكربونات تتفكّك مشكلة أيونات كربونات وأيونات هدروجين إضافية. وتسبّب هذه التغيرات الكيميائية انزياح مستويات التشبّع saturation horizons نحو الأعلى (نحو سطح البحر) فيما يتعلّق بمعدني الكالسيت والأراكونيت ـ حيث تذوب أصداف الكائنات الحية المكونة من هذين المعدنين في المياه العميقة تحت هذه المستويات.

وتوجد أمثلة أقل وضوحا في أمكنة أعمق من البحار، حيث تغطّي جزئيا تجمّعات من مرجانيات الماء البارد الحواف القارية و**الجبال البحرية** seamounts مشكّلة مواطن مهمة للأسماك.

تدين مرجانيات المياه الضحلة بألوانها الجميلة جزئيا إلى الطحالب المتكافلة معها التي تعيش داخل خلايا المرجان. تترك أحيانا هذه الطحالب عائلها (مضيفها) استجابة لأشكال متنوعة من الإجهاد البيئي كاشفة بذلك الهيكل الأبيض الذي تحتها المؤلّف من كربونات الكالسيوم. ويمكن أن تحدث عملية «**التبييض**» bleaching هذه، نتيجة لارتفاع درجات الحرارة ارتفاعا كبيرا مثلا. ويظن بعض العلماء أنّ ازدياد حموضة مياه المحيطات (أو بتعبير أصحّ نقصان في الحالة القلوية الضعيفة في مياه المحيطات) ينزع أيضا إلى الحضّ على مثل هذه الأحداث العرَضية.

البقاء للأثخن؟[**]

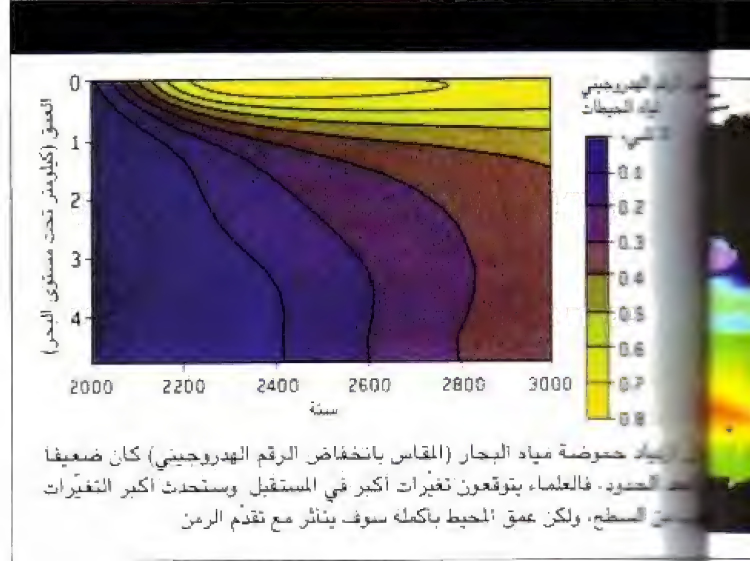
ومع ذلك يمكن أن تتأثّر المرجانيات والكائنات البحرية المكلسنة بازدياد الحموضة بطرق أكثر أهمية ـ أي يمكن لأصدافها في الواقع أن تتفتّت. وإذا أردت توضيح هذا القلق: دع قطعة من الطباشير (كربونات الكالسيوم) تسقط في كأس تحوي حمض الخل (وهو حمض ضعيف). ستبدأ قطعة الطباشير بالذوبان فورا. وللوصول إلى فهم أكمل لشكل الحياة الأكثر عرضة للخطر، مثل خطر الموت، لا بدّ من درس آخر في الكيمياء.

توجد كربونات الكالسيوم في المرجانيات أو في أصداف المخلوقات البحرية الأخرى في شكلين معدنيين اثنين: الكالسيت والأراكونيت. كما أن بعض الكائنات الحية التي تفرز الكالسيت تضيف عنصر المغنيزيوم إلى المزيج. ويكون كل من الأراكونيت والكالسيت المغنيزي أكثر ذوبانا من الكالسيت العادي. وهكذا فإن المرجانيات والپتروپودات التي تبني أصدافها من الأراكونيت والطحالب المرجانية المكونة أصدافها من الكالسيت المغنيزي، قد تكون معرَّضة بصورة خاصة للأذى نتيجة ازدياد حموضة مياه المحيطات.

تعتمد قابلية ذوبان كربونات الكالسيوم بصورة أساسية على

(*) The Ocean's Changing Acidity

(**) Survival of the Thickest?



...يداد حموضة مياه البحار (المقاس بانخفاض الرقم الهدروجيني) كان ضعيفا ...الحدود. فالعلماء يتوقعون تغيرات أكبر في المستقبل وستحدث أكبر التغيّرات ...السطح، ولكن عمق المحيط بأكمله سوف يتأثر مع تقدم الزمن

تركيز أيونات الكربونات (ومن ثم تعتمد بصورة غير مباشرة على الرقم الهدروجيني). ولكن قابلية الذوبان تتوقف أيضا على متغيّرات متعددة أخرى تتضمن درجة الحرارة والضغط. إن الكثير من المياه الباردة العميقة الحالية مياه حمضية تكفي لإذابة أصداف كربونات الكالسيوم ويقال لهذه المياه إنها مياه **«تحت مشبعة»** undersaturated. وتوصف المياه السطحية الدافئة الضحلة بأنّها **«فوق مشبعة»** supersaturated فيما يتعلّق بالكالسيت والأراكونيت على السواء، وهذا يعني عدم قابليتهما للذوبان. إنّ الانتقال بين الظروف تحت المشبعة والظروف فوق المشبعة يرجع إلى مستوى الإشباع: أي إلى المستوى الذي تبدأ تحته الأصداف والهياكل المؤلفة من كربونات الكالسيوم بالذوبان.

إن تدفق ثنائي أكسيد الكربون من الغلاف الجوي إلى المحيط تسبّب في إزاحة مستوى التشبّع للأراكونيت والكالسيت مسافة 50 إلى 200م إلى الأعلى نحو سطح المحيطات مقارنة بما كان عليه في القرن التاسع عشر. وتشير الدراسات الحديثة إلى أنّ مستوى التشبع سيرتفع أكثر في العقود القادمة. ومن ثم، كلّما ازدادت حموضة مياه المحيطات أكثر فأكثر، صارت الأجزاء العلوية منها، الصديقة للقواقع[1]، أقل سمكا. وبمعنى آخر ستصبح مياه المحيطات بالتدريج أقل ملاءمة للكائنات الحية المفرزة لكربونات الكالسيوم.

ومنذ البداية، استنتج الكثير من العلماء أنّ ازدياد حموضة مياه المحيطات يمكن أن يثير فقط مشكلة ثانوية لأنّ المياه السطحية ستبقى «فوق مشبعة» ـ على الأقل فيما يتعلّق بالكالسيت الذي هو الشكل الأكثر استقرارا من كربونات الكالسيوم. ففي أواخر التسعينات من القرن الماضي، قاد «C. لانكدون» [المتخصص في البيولوجيا البحرية بجامعة ميامي] تجربة متميّزة لاختبار هذا الافتراض: إذ غيّر كيمياء المياه على رصيف مرجاني صنعي أقيم في خزان ضخم في مختبر البيوسفير II بجامعة كولومبيا (الذي يقع، بصورة مستغربة، في وسط صحراء أريزونا). وبصورة مدهشة وجد أن معدّل إنتاج كربونات الكالسيوم في المرجانيات قد انخفض مع انخفاض الرقم الهدروجيني، مع أنّ المياه بقيت فوق مشبعة إلى حد بعيد فيما يتعلّق بالأراكونيت.

وبعد مدة قصيرة برهن «U. ريبيسل» [من معهد ألفرد وگنر للأبحاث البحرية والقطبية] وزملاؤه على وجود إعاقة مشابهة في نمو حاملات الكوكّوليتات الطافية. وتتوافر حاليا تجارب مختبرية للكشف عن التأثيرات المؤذية لتزايد ثنائي أكسيد الكربون (والرقم الهدروجيني الأخفض الذي ينتج منها) على كل المجموعات الرئيسية من الكائنات الحية البحرية التي تتمتع بأجزاء صلبة مؤلفة من كربونات الكالسيوم.

ونظرا إلى كون درجة فوق إشباع المياه الباردة هي أقل بصورة طبيعية من المياه الدافئة لجميع أشكال كربونات الكالسيوم، فإنّ نظُم البيئات المائية العميقة الواقعة في مناطق خطوط العرض العليا قد تكون الأولى التي تعاني ازدياد حموضة مياه المحيطات. والأمر الأكثر احتمالا أنّ المياه السطحية القطبية ستصبح «تحت مشبعة» بالنسبة إلى الأراكونيت قبل نهاية هذا القرن. واعتمادا على أعمال «V. J. فابري» [من جامعة ولاية كاليفورنيا، سان ماركوس]، فإنّ

وهكذا كلما ازدادت حموضة مياه المحيطات أكثر فأكثر صارت الأجزاء العلوية منها، الصديقة للقواقع[1]، أقل سمكا.

إحدى الإمكانيات المقلقة تكمن في أنّ البتروبودات القطبية سوف تختفي جميعها تماما، أو ربّما سوف تجبر على الهجرة إلى مناطق خطوط العرض الأدنى والأدفأ على افتراض إمكانية تكيّفها مع تلك البيئات. ولا يعلم أحد كيف سيؤثّر النقصان الكبير في عدد البتروبودات في الأجزاء الأخرى من النظام البيئي البحري. ولكن حقيقة أنّ تلك القواقع الصغيرة تشكل حلقة في السلسلة الغذائية للمحيط الجنوبي (فهي تعيل جماعات كبيرة من الأسماك والحيتان والطيور البحرية) هي سبب وجيه لهذا القلق.

وقد ينتظر العوالقَ البحريةَ الكلسية النباتية والحيوانية في خطوط العرض العليا مصير مشابه، مع أنّ تضاؤل أعدادها سيتم بعد عقود من الزمن بسبب أنّ أصدافها مكوّنة من الكالسيت وهو شكل كربونات الكالسيوم الأقل ذوبانا. ومن المحتمل أيضا أن تتأثر مجتمعات مرجان المياه العميقة وبصورة خاصة تلك التي تعيش في غرب الأطلسي الشمالي على طول ممر المياه المحتوية على تراكيز مرتفعة من الكربون الناجمة عن انبعاثات الوقود الأحفوري.

أمّا مستقبل الشعاب المرجانية المتوقع فمن المؤكد أنّه أكثر قتامة. وفي هذه النظم البيئية «الثمينة»، فإن ازدياد حموضة مياه المحيطات ليس إلا واحدا من إجهادات بيئية كثيرة، وهو هجوم يتضمّن: احترارا دفيئيا وتلوثا محليا وصيدا جائرا وتدميرا للمواطن. والكثير من الشعاب المرجانية حاليا في تراجع ويمكن أن يدفع ازدياد حموضة مياه المحيطات بعضها إلى الموت، ومن ثم إلى انقراضها.

تغيّر بحري قادم[*]

وبمقدار ما يتوقع من حدوث ظروف سيئة للكثير من الكائنات الحية البحرية، فإنه سيكون هناك بعض المنتصرين أيضا. ففي

(*) Coming Sea Change

(1) shell friendly



أحد أنواع البتروبودات (ليماسينا هيليسينا)

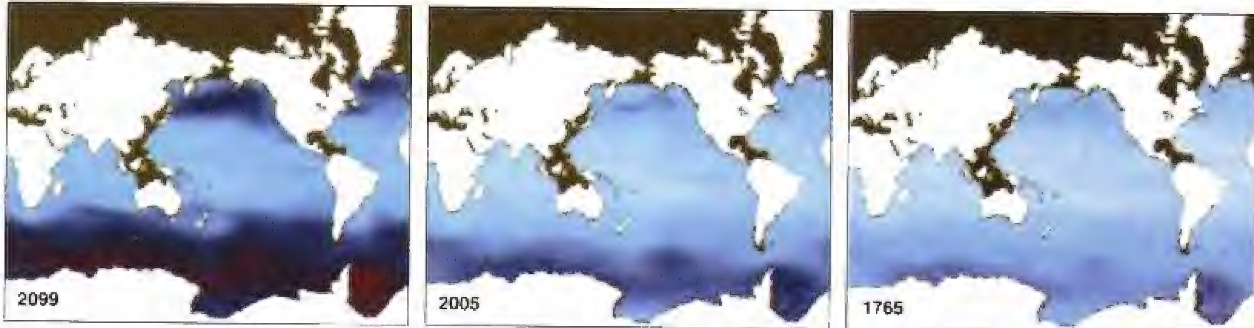
أحد أنواع حاملات الكوكوليثات (إميليانا هكسلي)

أحد أنواع المنخربات (كلوبيجرينا بولوئيد)

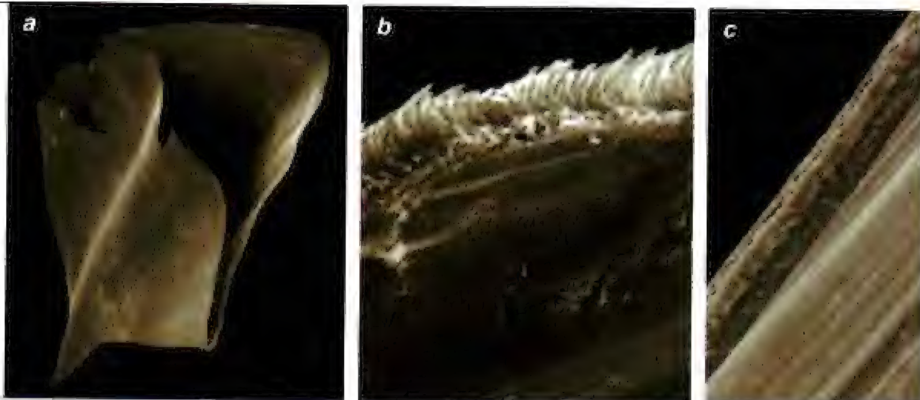
الوقت الحاضر، توجد كمية قليلة من الكربون في مياه البحر على شكل ثنائي أكسيد كربون ذائب، وهذه الندرة تحدّ من نمو بعض أنماط العوالق النباتية (كائنات نباتية طافية). ويكرّس الكثير من هذه الأنواع جزءا مهما من طاقته لتركيز ثنائي أكسيد الكربون داخل خلاياه. ومن المفترض أنّ الزيادات في ثنائي أكسيد الكربون المذاب ستكون مفيدة لها. وربّما هذا هو الذي سيحصل. ومع ذلك لم يُعرف الشيء الكثير عن هذا المفعول التسميدي fertilization لوضع تنبؤات ثابتة لمستقبل العوالق النباتية أو للقول فيما إذا كانت المستويات الأعلى لثنائي أكسيد الكربون ستفيد الطحالب التي تقوم بعملية التركيب الضوئي والتي تعيش داخل المرجانيات. إنّ الكثير من أنواع العوالق النباتية البحرية يستخدم أيون البيكربونات في عملية التركيب الضوئي. ونظرا إلى أن تركيز هذا الأيون لن يتغير

المستقبل «المُخرق» للأراكونيت(*)

إنّ نقصان مستويات الرقم الهدروجيني سيضعف قدرة بعض الكائنات البحرية على بناء أجزائها الصلبة وسوف يؤثّر هذا النقصان عاجلا وبشدة في المخلوقات التي تبني أجزاءها الصلبة من الأراكونيت - وهو شكل كربونات الكالسيوم الأكثر قابلية للذوبان. وستتغيّر درجة التهديد بحسب المناطق



قبل الثورة الصناعية (في اليمين) كانت المياه السطحية بمعظمها فوق مشبعة إلى حد كبير فيما يتعلّق بالأراكونيت (اللون الأزرق الفاتح) متيحة للكائنات الحية البحرية تكوين هذا المعدن بسهولة. غير أنّه في الوقت الحاضر (في الوسط) تكون درجة فوق إشباع المياه القطبية منخفضة جدا (اللون الأزرق القاتم). أمّا في نهاية هذا القرن (في اليسار) فإنّه من المتوقع أن تصبح أمثال هذه المياه الباردة، وبصورة خاصة تلك التي تحيط بقارة القطب الجنوبي، تحت مشبعة (اللون الأرجواني)، وهي شروط يصعب معها على الكائنات الحية تصنيع الأراكونيت وتؤدي إلى ذوبان الأراكونيت الذي تم تشكله



تشكل البتروبودات حلقة في سلسلة الغذاء في كامل المحيط الجنوبي. ويمكن أن تكون التغيّرات كارثية بالنسبة إلى هذه الحيوانات (والحيوانات التي تعتمد عليها في غذائها) كما تبين الصور (في اليمين). تبيّن الصورة a تآكل سطح صدفة البتروبود (التي وضعت لمدة 48 ساعة في مياه تحت مشبعة بالنسبة إلى الأراكونيت). وتبيّن الصورة b هذا التآكل بصورة أوضح وبتكبير أكبر. أمّا الصورة c فتبيّن صدفة لأحد البتروبودات لم تتعرض للذوبان.

(*) The (RAGGED) Future of Aragonite

تتضمن الكائنات الحية البحرية المعرَّضة للخطر من زيادة حموضة مياه المحيطات : المرجانيات والطحالب المرجانية التي توجد بصورة عامة في مجتمعات الشعاب المرجانية، إضافة إلى المنخربات وحاملات الكوكوليثات الموجودة بكثرة في معظم المياه السطحية. وهناك مجموعة أخرى مهددة هي القواقع البحرية الصغيرة التي تدعى البتروبودات وتعيش بصورة خاصة في المياه القطبية الباردة.


طحالب مرجانية (أمفيروا انسيس)


مرجان (تليبورا تنيلا)

كثيرا، فلا يتوقع البيولوجيون أن يزداد نمو هذه الكائنات الحية زيادة كبيرة. إنّ بعض النباتات الأرقى (مثل الأعشاب البحرية) يستخدم مباشرة ثنائي أكسيد الكربون المذاب، ومن المحتمل أنه سيستفيد من مستوياته المرتفعة تماما مثل النباتات الأرضية التي يزداد نموها عندما يزداد تركيز هذا الغاز في الغلاف الجوي.

كيف يمكن للعلماء أن يقيسوا بدقة استجابة النظم البيئية البحرية لعملية ازدياد حموضة المياه البحرية؟ إن معظم الجهود الحالية في هذا السياق تتركز على إجراء تجارب مختبرية لمدة قصيرة وعلى نوع واحد من الكائنات. إضافة إلى ذلك أجرى العلماء دراسات ميدانية محدودة لاختبار التأثيرات القاسية التي يمكن أن ترافق التخلص (بواسطة البشر) من ثنائي أكسيد

بدأ العديد من الشعاب المرجانية مرحلة الانحدار، وقد يؤدي ازدياد حموضة مياه المحيطات إلى دفع بعض هذه الشعاب إلى الانقراض.

الكربون الجوي في مياه البحر العميقة، وهذه هي إحدى الاستراتيجيات المختلفة التي فُكّر بها لعزل ثنائي أكسيد الكربون بعيدا عن الغلاف الجوي [انظر «هل يمكننا دفن الاحترار العالمي؟»، **العلوم**، العددان 11/10(2005)، ص 44]. ومع أنّ هذا العمل غني بالمعلومات، فالنتائج لم تترجم بسهولة إلى فهم عواقب التعرّض الطويل الأجل إلى رقم هدروجيني منخفض قليلا. كما أنّه ليس صحيحا أن تعمم الدراسات المختبرية على كامل النظم البيئية، حيث تتفاعل كائنات حية مختلفة كثيرة.

وإحدى الإمكانيات لبلوغ تقييم أكثر واقعية للمشكلة، يكون في رفع مستويات ثنائي أكسيد الكربون بصورة صنعية لمدة أشهر وسنين في رقعة من المحيط أو في رصيف مرجاني. إنّ التجارب المتعلقة بتغيير مستويات ثنائي أكسيد الكربون على مدى واسع قد تم تنفيذها بصورة عامة على اليابسة، ويقوم حاليا علماء بحار ومهندسون باستكشاف طريقة عملية (لوجيستية) لتوسيع هذا النهج على المحيطات. أمّا التكتيك الآخر فيكمن في دراسة كيفية تكيّف الكائنات الحية في المناطق التي كانت لمدة طويلة معرضة إلى رقم هدروجيني منخفض، مثل جزر گالاباگوس المحاطة بمياه غنية، بصورة طبيعية، بثنائي أكسيد الكربون.

ومع ذلك فالاستراتيجية الثالثة تكمن في دراسة السجل الجيولوجي لأزمنة وصلت فيها تراكيز ثنائي أكسيد الكربون إلى مستويات أعلى ممّا هي عليه حاليا عندما كان الرقم الهدروجيني، على الأرجح، أدنى ـ مثلا خلال فترة المناخ الدافئ الشاذ التي حدثت قبل نحو 55 مليون سنة (فترة الحرارة العظمى الباليوسينية-الإيوسينية)، حينما انقرض الكثير من الكائنات الحية البحرية. وفي الوقت الحاضر يكمن قلق الكثير من العلماء في أنّ الزيادة الحالية في حموضة المحيطات تحدث بسرعة أكبر مما كانت عليه من قبل، لدرجة لم تترك للأنواع البحرية الوقت الكافي للتكيّف معها. ومع أنّ التأثيرات قد تكون خفية، فإن التغيّرات المثيرة في البيئة البحرية قد يتعذر تجنبها على ما يبدو ■

المؤلف

Scott C. Doney

أستاذ في قسم كيمياء، وجيوكيمياء، البحار بمعهد وودز هول لعلوم البحار. وقد بدأ دراساته في علوم البحار عندما كان طالبا في مرحلة البكالوريوس بجامعة كاليفورنيا ـ سان دييگو، إلى أن حصل على شهادة الدكتوراه في كيمياء البحار عام 1991 بعد أن أنهى برنامجا مشتركا بين معهد ماساتشوستس التقاني ومعهد وودز هول لعلوم البحار. وتعد خدماته في الفريق العلمي لمرصد الكربون المداري في الوكالة ناسا واحدا من نشاطاته المميزة. وهو رئيس مجموعة التوجيه العلمي لدراسة التغير المناخي وكربون البحار التي تعتبر جزءا من البرنامج الأمريكي لأبحاث التغيرات العالمية

مراجع للاستزادة

Anthropogenic Carbon and Ocean pH. Ken Caldeira and Michael E. Wickett in *Nature*, Vol. 425, page 365; September 25, 2003.

Anthropogenic Ocean Acidification over the Twenty-First Century and Its Impact on Calcifying Organisms. James C. Orr et al. in *Nature*, Vol. 437, pages 681–686; September 29, 2005.

Ocean Acidification Due to Increasing Atmospheric Carbon Dioxide. Royal Society, 2005. Available at **www.royalsoc.ac.uk/displaypagedoc.asp?id=13314**

Scientific American, June 2006

Majallat AlOloom

مجلة العلوم

المجلد 22 ـ العدد 10
اكتوبر (تشرين الأول) 2006

جزيئات خضراء (صديقة للبيئة)(*)

اخترع الكيميائيون مجموعة جديدة من الحفازات يمكنها تدمير بعض أسوأ الملوثات قبل دخولها البيئة.

<J. ـ كولينز> ـ <Ch> والتر>

لم تعد الأسماك التي تعيش في نهر أناكوستيا الذي يتدفق في قلب واشنطن العاصمة تستمتع كثيرا بمياهه. فهذا النهر ملوث ببقايا جزيئية من الأصبغة والبلاستيك والأسفلت ومبيدات الهوام(1). فقد بينت الاختبارات الحديثة أن ما يصل إلى 68 في المئة من أسماك السلور القدي البنية(2) التي تعيش فيه مصابة بسرطان الكبد. ولذلك أوصى المسؤولون عن الحياة البرية بأن تعاد الأسماك التي يجري اصطيادها إلى النهر من دون أكلها، كما منعت السباحة فيه.

ويعد الأناكوستيا واحدا من عشرات الأنهار الشديدة التلوث في الولايات المتحدة. وتطرح صناعة النسيج وحدها 53 بليون كالون من الفضلات السائلة ـ المحملة بالأصبغة التفاعلية ومواد كيميائية خطرة أخرى ـ في الأنهار ومجاري المياه الأمريكية كل عام. وقد أخذت أصناف جديدة من الملوثات تظهر في مياه الشرب في البلاد، وتتمثل في آثار من الأدوية ومبيدات الهوام ومواد التجميل وحتى هرمونات تحديد النسل [*انظر الشكل في الصفحة 48*]. وتكون كميات هذه المواد، في الغالب، لامتناهية في الصغر وتقاس بالأجزاء في البليون أو الأجزاء في التريليون (يعادل الجزء في البليون تقريبا حبة من الملح مذابة في حوض سباحة). ومع ذلك يظن العلماء أن حتى هذه الكميات الضئيلة من بعض الملوثات يمكنها أن تفسد الكيمياء الحيوية النمائية التي تحدد السلوك البشري والذكاء والمناعة والتكاثر.

ولحسن الحظ فإن تباشير المساعدة بدأت تلوح في الأفق. ففي العقد الماضي، بدأ الباحثون في مجال الكيمياء الخضراء الحديث العهد بالتخطيط لاستبعاد أخطار المنتجات الكيميائية ومعالجاتها. وقدم هؤلاء العلماء صيغا لبدائل أكثر أمانا لما هو مضر من الدهانات والبلاستيك واخترعوا تقنيات تصنيع جديدة تقلل من طرح الملوثات في البيئة. وتبين مؤسسة الكيمياء الخضراء المتفرعة من الجمعية الكيميائية الأمريكية أن المبدأ الأول لهذه الجماعة من الباحثين هو: «إنّ منع النفايات أفضل من معالجتها أو استبعادها بعد تكونها.» وفي سياق هذا الجهد، قدم الباحثون كذلك اكتشافات تبشر بطرائق منخفضة التكلفة لإزالة العديد من الملوثات المستديمة من النفايات السائلة.

ونورد مثالا على هذا العمل، ما قام به الباحثون في مؤسسة كيمياء الأكسدة الخضراء التابعة لجامعة ميلون كارنيگي [أحدنا (كولينز) هو مدير هذه المؤسسة] من تطوير مجموعة من الجزيئات المحفزة المصممة تدعى ـ لجينة حلقية ماكروية (كبرية) رباعية الأميدو (TAML)(3)، وهي منشطات تعمل مع بيروكسيد الهدروجين(4) وبعض المؤكسدات الأخرى على تفكيك تشكيلة متنوعة من الملوثات العنيدة. وتنجز اللجائن TAMLs تلك المهمة عن طريق محاكاة الدور الذي تقوم به الإنزيمات التي تطلقها أجسامنا مع مرور الوقت لمقاومة المركّبات السامة. وبرهنت اللجائن TAMLs، في المختبر وفي التجارب الميدانية، أنها تستطيع تدمير مواد خطرة مثل مبيدات الهوام والأصبغة وملوثات أخرى، مخفضة بذلك إلى درجة كبيرة رائحة ولون النفايات السائلة التي تطرحها معامل الورق وقاتلة بذلك الأبواغ البكتيرية الشبيهة بسلالة بكتيرة الجمرة الخبيثة المميتة. ويمكن إذا ما جرى تبني اللجائن TAMLs هذه على نطاق واسع توفير ملايين الدولارات التي تنفق على التنظيف. إضافة إلى ذلك، فإن هذا النوع من الأبحاث يوضح أن بإمكان الكيمياء الخضراء تخفيض بعض الدمار البيئي الذي تسببه الكيمياء التقليدية.

نظرة إجمالية/ حفازات تساعد على عمليات التنظيف(**)

- أصبحت الملوثات العديدة التي تطرح في مجاري المياه، مثل الأصبغة ومبيدات الهوام، موجودة في كل مكان، ومن ثم أخذت تشكل تهديدا جديا لصحة البشر.
- اخترع الكيميائيون حديثا حفازات تشبه الإنزيمات، وهي منشطات مكونة من لجائن ligands حلقية ماكروية رباعية الأميدو (اختصارا TAMLs) يمكنها تدمير الملوثات المعندة بتسريع تفاعلات التنظيف مع بيروكسيد الهدروجين.
- عندما أضيفت الحفازات TAMLs إلى نفايات المياه الناتجة من مصانع عجينة الورق قامت بتخفيض محتواها من الكيميائيات الخطرة والمسببة للتلون. ويمكن مستقبلا استعمال هذه الحفازات لتعقيم مياه الشرب والتصدي للتلوث الذي قد يحدثه هجوم إرهابي بيولوجي.

الحاجة إلى أن نكون خضراً(***)

إن السبب الأساسي لتصعيدنا المشكلة

(*) LITTLE GREEN MOLECULES

(**) Overview/ Catalysts for Cleaning

(***) The Need to Be Green أي أن نكون من حماة البيئة

(1) pesticides

(2) brown bullhead catfish

(3) tetraamido macrocyclic ligand، واللجينة [أو الربيطة ligand] هي جزيء يتحكم في جزيء آخر، وجمعها لجائن.

(4) أو فوق أكسيد الهدروجين أو الماء الأكسجيني. (التحرير)



التحكم في التلوث: حفازات تدعى TAMLs (الأخضر) تعمل مع بيروكسيد الهدروجين (الأزرق) لتحطيم الكلوروفينولات (البني) التي تلوث مياه المجاري الواردة من مصادر صناعية عديدة.

البيئية هو أن الناس يمارسون الكيمياء بطرائق تختلف عن تلك التي تمارسها الطبيعة: إذ ركز تطور العمليات البيوكيميائية عبر الزمن بشكل رئيسي على استعمال العناصر المتوافرة والقريبة التناول - مثل الكربون والهدروجين والأكسجين والنتروجين والكبريت والكالسيوم والحديد - لتكوين كل شيء، من **البارامسيوم**[1] إلى **شجرة السكويه**[2] redwood ومن **سمكة المهرج** clown fish إلى الإنسان. أما صناعاتنا فإنها على العكس من ذلك، تقوم بجمع العناصر من كل بقعة من بقاع الأرض وتوزعها بطرائق لا يمكن للعمليات الطبيعية أن تقوم بها. فعلى سبيل المثال، من المعروف أن الرصاص يوجد غالبا في توضعات معزولة وثانية بحيث لم تضمّنه الطبيعة قط في الكائنات الحية. أما اليوم فالرصاص منتشر في كل مكان، ويعود سبب ذلك بشكل رئيسي إلى أن صناعات الدهان والسيارات والحواسيب قد أسهمت في نشره. وعندما يجد الرصاص طريقة للانتقال إلى الأطفال يصيبهم بسمية شديدة حتى في الجرعات الصغيرة جدا. وينطبق الأمر ذاته على الزرنيخ والكادميوم والزئبق واليورانيوم والبلوتونيوم. فهذه العناصر هي ملوثات مستديمة لا تتفكك في أجسام الحيوانات ولا في البيئة - لذلك تبرز الحاجة الملحة إلى إيجاد بدائل أكثر أمانا.

الكيمياء الخضراء (صديقة البيئة) تستطيع تخفيف بعض المضار البيئية التي تسببها الكيمياء التقليدية.

تختلف بعض الجزيئات التركيبية الجديدة في الأدوية والپلاستيك ومبيدات الهوام عن منتجات الكيمياء في الطبيعة إلى درجة تبدو فيها تلك الجزيئات كما لو أنها سقطت علينا من عالم خارجي. فالعديد من هذه الجزيئات لا يتفكك بسهولة، حتى ما كان منها **بيولوجي التدرّك (التقوض)** biodegradable، صار موجودا أينما نظرت بسبب إفراطنا في استعماله. وتبين الأبحاث الحديثة أن بعض هذه المواد يمكن أن يتدخل في **التعبير الطبيعي** normal expression للجينات ذات الصلة بتطور جهاز التناسل الذكوري. فمن المعروف لدى العلماء منذ بضع سنوات، أن التعرض السابق للولادة لمادة **الفثالات** phthalates، وهي مركّبات تستعمل في الپلاستيك ومستحضرات التجميل، يمكن أن يحدث تغييرا في الجهاز التناسلي لذكور القوارض الحديثة الولادة. وفي عام 2005 بينت <Sh. سوان> [من كلية الطب وطب الأسنان في جامعة روشستر] تأثيرات مشابهة في أطفال ذكور. وفي دراسة أخرى ترأستها <سوان> تبيّن أن الذكور الذين يعانون انخفاضا في تعداد النطاف والذين يعيشون في المناطق الريفية الزراعية بولاية ميسوري لديهم مستويات مرتفعة من مبيدات الأعشاب (مثل الألاكلور والأترازين) في البول. فإذا ما بدأنا من معاملنا ومزارعنا وصرفنا الصحي نجد أن الملوثات المستديمة يمكن أن تجول، محافظة على بنيتها، في الهواء والماء وعبر السلسلة الغذائية لتعود مباشرة إلينا في معظم الأحيان.

ويقوم الكيميائيون الخضر في الجامعات والشركات، بهدف مواجهة هذا التحدي، بالبحث في جدوى إيجاد بدائل أكثر صداقة للبيئة تحل محل أكثر المنتجات وعمليات التصنيع سمية [*انظر الإطار في الصفحة 50*]. تعود بداية العمل الذي قام به فريق <كولينز> [في كارنيگي ميلون] إلى الثمانينات، عندما كان القلق من تأثير الكلور في الصحة العامة يتعاظم. وكان الكلور في ذلك الوقت ومازال حتى الآن المادة التي غالبا ما تستعمل في عمليات التنظيف والتعقيم التي تُجرى على نطاق واسع في التصنيع، وكذلك في معالجة مياه الشرب. ومع أن المعالجة بالكلور رخيصة وفعالة، فإن بإمكانها تكوين بعض الملوثات الشديدة. لقد كان استعمال الكلور بشكله العنصري في مصانع الورق لتبييض عجينة الورق المصدر الرئيسي للديوكسينات المسببة للسرطان إلى أن منعت وكالة حماية البيئة هذه العملية في عام 2001. (نشير إلى أن معظم المصانع تبيّض حاليا عجينة الورق بثنائي أكسيد الكلور الذي يخفض توليد الديوكسينات من دون أن يوقفه.) وكذلك جرى ربط بعض المنتجات الثانوية الناجمة عن كلورة ماء الشرب ببعض أنواع السرطان. أما الكلور بشكله الشائع في الطبيعة - أيونات الكلوريد أو أملاح منحلة في الماء - فإنه غير سام. ولكن عندما يتفاعل الكلور العنصري مع جزيئات أخرى يمكن أن يشكل مركبات تستطيع أن تفسد الكيمياء الحيوية للحيوانات الحية. فمثلا، تعيق الديوكسينات التنامي الخلوي بتدخلها في منظومة استقبال تنظم إنتاج بروتينات أساسية.

ونتساءل هل يمكن استعمال عوامل التنظيف التي تعتمدها البيئة (بيروكسيد

(1) paramecium

(2) شجر حرجي من الفصيلة الصنوبرية قد يصل طوله الى ثلاثمئة قدم. (التحرير)



يأتي تلوث المياه من عدة مصادر. لكن الحفازات TAMLs المكتشفة حديثا تستطيع تدمير بعض أسوأ الملوثات قبل وصولها إلى الأنهار والبحيرات. فمثلا، يمكن بإضافة الحفازات TAMLs إلى نفايات مياه مصانع النسيج وعجينة الورق تفكيك الأصبغة والكلوريات العضوية والكيميائيات الخطرة الأخرى. ويمكن أيضا استعمال الحفازات TAMLs لمعالجة المياه التي تفرغ من برك النفايات الزراعية وكذلك من مياه الصرف الصحي السكنية، والتي تحتوي على الأصبغة الناتجة من استعمال آلات الغسيل وعلى آثار من المواد الصيدلانية الضارة التي تفرز في بول البشر

تعمل الحفازات سواء كانت طبيعية أو من صنع الإنسان عمل الخاطبات في بعض المجتمعات القديمة.

الهدروجين والأكسجين) في تنقية المياه وتخفيض النفايات الصناعية بدل الاعتماد على الكلور. بالتأكيد، يمكن أن يؤدي استعمال مادتي التنظيف هاتين كليا وبأمان وقوة إلى منع تشكل العديد من الملوثات، ولكن في الطبيعة تتطلب هذه العملية وجود إنزيم(1). تقوم الحفازات سواء كانت طبيعية أو من صنع الإنسان بدور الخاطبات في بعض المجتمعات القديمة، إلا أنها بدل الجمع بين زوجين من البشر، توحد بين جزيئات معينة مؤدية بذلك إلى تمكين وتسريع حدوث التفاعل بين تلك الجزيئات. ويمكن لبعض الأنواع من الحفازات الطبيعية أن تزيد سرعة حدوث التفاعل بليون ضعف. فلولا وجود إنزيم البتايلين(2) في لُعابنا لوجب انقضاء أسابيع قبل أن يتمكن جسمنا من «تكسير» المعكرونة وتحويلها إلى السكاكر(3)

المكونة لها. ولولا وجود الإنزيمات لكانت حركة الكيمياء الحيوية تجري بمعدل بطيء أشد البطء، ومن ثم لاستحال وجود الحياة بالشكل الذي هي عليه.

وفي الطبيعة يتم استخدام الإنزيمات المسماة بيروكسيدازات في تحفيز التفاعلات التي يدخل فيها بيروكسيد الهدروجين، وهو المادة الكيميائية المألوفة منزليا والمستعملة في صبغ الشعر وإزالة البقع عن السجاد. وتوظف الفطور التي تنمو حول جذوع الأشجار العفنة في الغابات، البيروكسيداز لتحطيم بوليميرات **الليكنين** lignin الموجودة في الخشب فتنشطر الجزيئات الكبيرة متحولة إلى جزيئات أصغر يستطيع الفطر أكلها. وتوجد أيضا عائلة أخرى من الإنزيمات تسمى السيتوكرومات p450s تحفز التفاعلات التي يدخل فيها الأكسجين

(تسمى أيضا تفاعلات الأكسدة). يستعمل هذا الحفاز الموجود في كبد الإنسان الأكسجين لتخريب عدد كبير من الجزيئات السامة الداخلة عن طريق التنفس أو الطعام بفعالية وكفاءة كبيرتين.

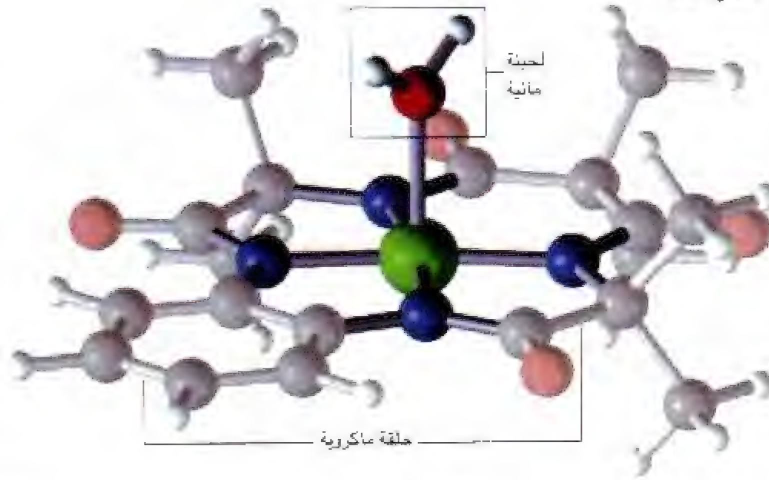
ومنذ عقود يجهد الكيميائيون في بناء جزيئات تركيبية (صنعية) صغيرة يمكنها أن تضاهي تلك الإنزيمات المذهلة. وعندما يتمكن العلماء من إيجاد هذه الجزيئات المصممة التي تمتلك قدرة محفزة قوية، يصبح بإمكانهم الاستغناء عن تقانات الأكسدة القائمة على الكلور أو ذات الأساس المعدني التي تولد الكثير من الملوثات. وفي أوائل الثمانينات، لم يكن الحظ قد حالف أحد لتطوير نسخ من هذه الإنزيمات في المختبرات؛ أما الطبيعة فقد قامت على مدار بلايين السنين من التطور بوضع ألحان بعض الرقصات المحفزة الشديدة التعقيد والرائعة الأناقة، جاعلة جهودنا في المختبر تبدو

(1) بمعنى حفاز كيميائي حيوي يزيد بمقدار كبير سرعة التفاعل
(2) ptyalin
(3) sugars

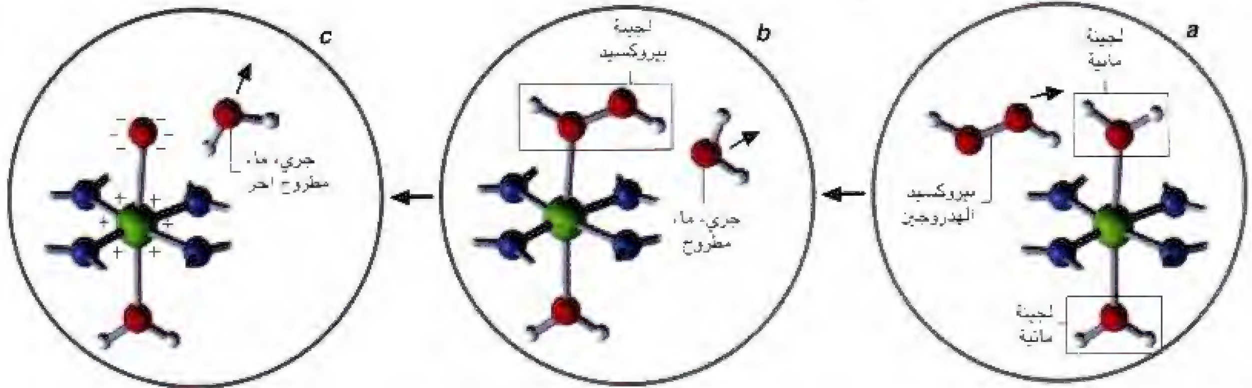
آلة غسيل جزيئية(*)

صمم الكيميائيون حفازات TAMLs تقلّد الإنزيمات الطبيعية التي تحفز تفاعلات يدخل فيها بيروكسيد الهدروجين. ولكن الحفازات TAMLs أصغر بمئات المرات من الإنزيمات، مما يجعلها أرخص وأسهل تصنيعا

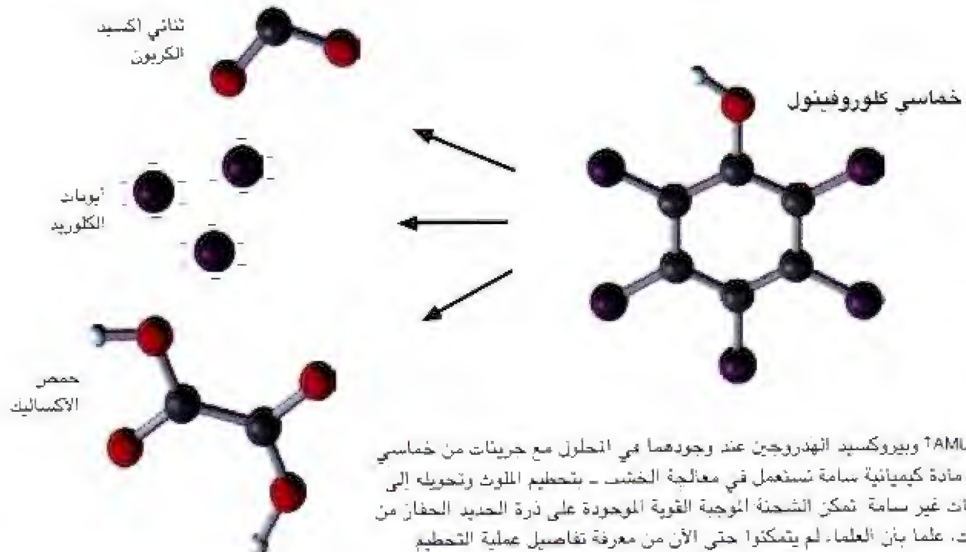




يوجد في مركز كل الحفازات TAMLs ذرة حديد ترتبط بأربع ذرات نتروجين. ويوجد عند الحافة حلقات كربونية يتصل بعضها ببعض مشكلا حلقة خارجية كبيرة تدعى حلقة ماكروية (كبرية). ويقوم نظام الوصل هذا بدور جدار ناري مكسبا الجزيء القدرة على تحمل التفاعلات العنيفة التي يطلقها. يمتلك الحفاز TAML في حالته الصلبة أيضا جزيء ماء (H_2O) متصلا بذرة الحديد (الزمر المتصلة تدعى لجائن ligands)



عندما يذوب جزيء TAML في الماء يرتبط جزيء H_2O آخر بالحفاز (a). وإذا وجد بيروكسيد الهدروجين في المحلول أيضا، فإنه يحل جزيء منه محل إحدى اللجائن المائية ذات الاتصال الضعيف فتطرح بسهولة (b). وعندئذ تتخلى لجينة البيروكسيد عن ذرتي الهدروجين التابعتين لها وذرة أكسجين على شكل جزيء ماء، مخلفة ذرة أكسجين واحدة متصلة بالحديد (c). يسحب الأكسجين الإلكترونات باتجاه أبعد عن ذرة الحديد جاعلا الحفاز TAML مركبا وسطا فعالا



يقوم الحفاز TAML وبيروكسيد الهدروجين عند وجودهما في المحلول مع جزيئات من خماسي كلوروفينول - مادة كيميائية سامة تستعمل في معالجة الخشب - بتحطيم الملوث وتحويله إلى مركبات وأيونات غير سامة. تمكن الشحنة الموجبة القوية الموجودة على ذرة الحديد الحفاز من تحطيم الملوثات، علما بأن العلماء لم يتمكنوا حتى الآن من معرفة تفاصيل عملية التحطيم

(*) A Molecular Cleaning Machine

الكيمياء تتحول إلى خضراء(*)

يعد اختراع الحفازات TAMLs واحدا من إنجازات الكيمياء الخضراء العديدة، التي تبذل جميع إمكاناتها في تطوير منتجات وعمليات تصنيع تخفف أو تزيل استعمال أو توليد المواد الخطرة. ونورد فيما يلي بعض هذه الإنجازات

المشروع	المشاركون	الوضع
استعمال السكر الموجود في النباتات لصنع حموض البولي لاكتيك (PLAs)، وهي زمرة من البوليميرات المتفككة حيويا يمكنها أن تحل محل البلاستيك المشتق من النفط	<P. كروبر>، <R. L. هوارد>، <J. J. كولستاد>، <C. M. راين>، <R. C. بوب> [الشركة نيتشروواركس LLC (فرع من كارگيل)]	بنت الشركة نيتشروواركس مصنعا في نبراسكا لتصنيع حبيبات PLA التي تستعمل في تصنيع قوارير تعبئة المياه ومواد التغليف ومنتجات أخرى
اكتشاف تفاعلات تصنيع يمكن عند تطبيقها في الإنتاج استعمال الماء بدلا من العديد من المذيبات العضوية التي قد يسبب بعضها السرطان.	<Ch. جان لي>، جامعة ماكگيل	تدرس شركات الأدوية وشركات الكيميائيات السلعية عمليات التصنيع
تطوير كيمياء الاستبدال للوصول إلى طرائق تركيب عضوية تنتج الأدوية والبلاستيك وكيميائيات أخرى بكفاءة أكبر ونفايات أقل	<R. H. كربس> [مؤسسة كاليفورنيا للتقانة]، <R. R. شروك> [مؤسسة ماساشوسيتس للتقانة]، <Ü. شوفين> [المؤسسة الفرنسية للنفط]	هذا النوع من الأبحاث مطبق على نطاق واسع في الصناعات الكيميائية والتقانة الحيوية والصناعات الغذائية. وفي عام 2005 حصل على جائزة نوبل في الكيمياء
الاستعاضة عن المذيبات ذات الأساس النفطي السامة بثنائي أكسيد الكربون فوق الحرج ـ وهو مائع في درجة حرارة وضغط عاليين ويتصف بخواص السوائل والغازات معا	<M. بولاكوف>، <M. جورج>، <S. هاوديل> [جامعة نوتنگهام في إنكلترا]	<Th. سوان> وشركاه، شركة تصنيع بريطانية مختصة بإنتاج الكيميائيات ذات الأغراض الخاصة، شيدت مصنعا يقوم على استعمال الموائع فوق الحرجة
اختراع طريقة جديدة لإنتاج سيرترالين، المكون الرئيسي في تصنيع مضاد الاكتئاب زولوفت	<J. سباڤين> و<J. تابر> و<J. كولبيرك> و<D. فيرتيرر> [الشركة فايزر]	هذه العملية الصناعية تُخفض التلوث وكذلك الطاقة والماء اللازمين، في حين تحسن من أمان العمال ومردود الإنتاج

أمامها ضئيلة. ومع ذلك فإننا ندرك عدم إمكان تحقيق هدفنا في تخفيض التلوث ما لم نجد طريقة لتقليد هذه الرقصات الجزيئية.

المحولات المحفِّزة(**)

وكذلك فإن تكوين الإنزيمات التركيبية يعني تجميع جزيئات يمكنها أن تصمد، بحيث تستطيع مقاومة التفاعلات الإتلافية التي يتم تحفيزها. فكل العمليات التي يشارك فيها الأكسجين يمكن أن تكون تخريبية، لأن الروابط التي يرتبط بها مع العناصر الأخرى (وبخاصة الهدروجين) قوية جدا. كما يعد بيروكسيد الهدروجين (H_2O_2) مؤكسدا قويا، لأن كل جزيء من جزيئاته يقع في موقع وسط ما بين الماء (H_2O) والأكسجين الجزيئي (O_2). ونشير إلى أنه غالبا ما يولد بيروكسيد الهدروجين في الماء نوعا من النار السائلة تدمر جميع الجزيئات العضوية (تحتوي على الكربون) التي حولها. وتوضح بنية الإنزيمات أن الحصول على حفّاز قادر على العمل ربما يلزمه وضع ذرة من الحديد داخل مصفوفة جزيئية من الزمر العضوية، أي يجب أن نقوي البنيان المعماري الجزيئي لمثل هذه الزمر لتتمكن من تحمل النار السائلة الناتجة من تنشيط بيروكسيد الهدروجين.

وباستفادتنا مما صممته الطبيعة في هذا المجال، توصلنا في نهاية المطاف إلى حل هذه المسألة بتصنيع حفاز تتوضع فيه ذرة مفردة من الحديد في وسط مربع تقع على رؤوسه أربع ذرات من النتروجين [انظر الإطار في الصفحة 49]. ترتبط ذرات النتروجين بذرة الحديد الأكبر بكثير منها بروابط تكافئية، بمعنى التشارك في زوجين من الإلكترونات. وفي مثل هذه البنية، تسمى الذرات الأصغر والزمر المرتبطة المحيطة بذرة المعدن المركزية لجائن legands. وقمنا بعد ذلك بوصل اللجائن لتشكيل حلقة خارجية كبيرة سميناها **الحلقة الماكروية (الكبرية)** macrocycle. وبمرور الوقت تعلمنا كيف نجعل اللجائن ومنظومات الوصل ذات قوة كافية لتحمل التفاعلات العنيفة التي تقدمها اللجائن TAMLs. أما في الواقع، فإن اللجائن التي ابتكرناها تقوم بدور جدار ناري يقاوم النار السائلة، وكلما طالت هذه المقاومة ازدادت فائدة الحفاز. ولم نكن نرغب طبعا في أن نخترع حفازا غير قابل للتخرب، فينتهي به المطاف في المسيلات المائية المتدفقة في البيئة، وهذا قد يؤدي إلى خلق مشكلة تلوث خاصة به. إن جميع حفازاتنا TAMLs الحديدية الحالية (في هذه الحفازات يمثل الحديد ذرة المعدن المركزية) تتفكك في فترة زمنية ما بين دقائق وساعات.

إن بناء جدران نارية من اللجائن لم يكن عملا سهلا، إذ تطلب تطوير دورة تصميم مرهقة ذات أربع مراحل: أولا، بدأنا بتخيل وتصنيع بنى لجينية يؤمل منها أن تستطيع الحفاظ على ديمومة الجدار الناري. ثانيا، أخضعنا الحفاز إلى إجهاد تأكسدي استمر إلى أن تخرب الجدار الناري. ثالثا، فتشنا بدقة عن الموقع الذي بدأ فيه حدوث التقويض (وجدنا أن التقويض اللجيني كان يبدأ دائما عند أكثر المواقع ضعفا). وأخيرا، بعد أن حددنا الوصلة الأضعف استبدلنا بها مجموعة من الذرات نعتقد أنها ستتحمل مدة أطول، وبعدها بدأنا من جديد كامل دورة التصميم.

(*) Chemistry Goes Green
(**) Catalytic Converters

وأخيرا بعد 15 سنة من العمل ابتدعنا أول لجينة TAML قادرة على العمل. فلقد عرفنا في صباح أحد الأيام أننا نجحنا وذلك عندما قام .C> هورويتز» [وهو أستاذ باحث في مؤسستنا] بعرض نتائج تجربة التبييض bleaching باستخدام أفضل ما كنا صممناه في ذلك الوقت. وفحصنا النتائج وكان الأمر جليا. فكلما رش «هورويتز» صباغا قاتما في محلول يحتوي على الحفاز TAML وبيروكسيد الهدروجين يصير المحلول بسرعة عديم اللون. لقد عرفنا حينها أن جدراننا النارية صارت أخيرا قادرة على التحمل فترة تكفي للسماح للحفاز TAML بالقيام بعمله. لقد نجحت هذه الجزيئات في أداء دور الإنزيمات، مع أنها كانت أصغر بكثير جدا: يبلغ الوزن الجزيئي للحفاز TAML نحو 500 دالتون (يساوي الدالتون الواحد 1/12 من كتلة الكربون 12، وهو أكثر نظائر الكربون وفرة)، في حين يبلغ الوزن الجزيئي لبيروكسيداز الجرجار (فجل حار)، وهو إنزيم صغير نسبيا، نحو 40 000 دالتون. لذلك فإن الحفازات TAMLs الشديدة الصغر أسهل تصنيعا وأرخص وذات فعاليات أكثر تنوعا بكثير من نظيراتها الطبيعية.

ومنذ ذلك الوقت قمنا بتصنيع أكثر من 20 نوعا مختلفا من الحفازات TAMLs بإعادة تطبيق نفس عملية التصميم ذات الأربع مراحل التي مكنتنا من اكتشاف أول نموذج قادر على العمل. ونشير إلى أن كل حفاز TAML يتصف بأنه ذو عمر وسرعة تفاعل خاصين به، وذلك يسمح لنا أن نصنع حفازات وفق المهمات التي نريدها منها. هذا وتتضمن معظم الحفازات عناصر مثل الكربون والهدروجين والأكسجين والنتروجين والحديد، وهي عناصر تم انتقاؤها بسبب سميتها المنخفضة. ونطلق اسم «الحفازات TAMLs الصيادة» على بعض الجزيئات لأنها صُممت لتبحث عن ملوثات أو كائنات مُمْرضة محددة فتعطلها بنفس الطريقة التي يبحث فيها اللغم المغنطيسي عن الهيكل المعدني للسفينة. وتقوم مركبات TAMLs أخرى بدور مشعل لهبي يحرق بشراسة معظم المواد الكيميائية القابلة للتأكسد والتي توجد متلامسة معه. وهناك مركبات TAMLs أخرى أقل شراسة من سابقتها وأكثر انتقائية بحيث يمكنها مثلا مهاجمة بعض أجزاء الجزيئات فقط أو مهاجمة الجزيئات الأكثر قابلية للتأكسد في المجموعة. ونتوقع أن نهيئ الحفازات TAMLs لتعزيز تقدم الكيمياء الخضراء في العقود القادمة. وتدل النتائج - التي أمكن الحصول عليها حتى الآن، على الرغم من وجوب إجراء المزيد من اختبارات السمية - على أن الحفازات TAMLs تفكك الملوثات وتحولها إلى مكوناتها غير السامة فلا تترك وراءها أي تلوث يمكن كشفه. ونملك اليوم أكثر من 90 براءة اختراع دولية تخص الحفازات TAMLs، وهناك المزيد منها في الطريق. يضاف إلى ذلك ما نملك من تراخيص تجارية عديدة.

إن تكوين الحفازات TAMLs في المختبر شيء، ولكن الشيء الأهم هو تجهيزها للاستخدام التجاري.

ومما يثير الاهتمام، أننا مازلنا لا نعرف جميع تفاصيل الطريقة التي تعمل وفقها الحفازات TAMLs، مع أن دراسات حديثة قدمت استبصارات عميقة عن التفاعلات الأساسية. تحتوي الحفازات TAMLs الحديدية في الحالة الصلبة على جزيء ماء واحد يتصل بذرة الحديد على شكل لجينة، ويتوجه عموديا إلى اللجائن النتروجينية الأربع. وعندما يكون المركب في محلول يرتبط جزيء ماء آخر بالجهة المقابلة لذرة الحديد. وتكون هذه اللجائن المائية ضعيفة الارتباط جدا، بحيث إذا وجد في المحلول كذلك بيروكسيد الهدروجين فإن جزيئا منه يحل بسهولة محل أحد جزيئات الماء. وهنا سرعان ما تستعيد لجينة البيروكسيد ترتيب نفسها طاردة ذرات الهدروجين التابعة لها وذرة أكسجين واحدة (تطرد على شكل H_2O جزيء ماء) مخلفة ذرة أكسجين واحدة مرتبطة بالحديد في مركز المركب TAML الحديدي الذي يدعى عندئذ المركب الانتقالي المتفاعل (RI)[1].

إن الأكسجين أكثر كهرسلبية electronegative بكثير من الحديد، ويعني ذلك أن نواته تجذب معظم الإلكترونات الموجودة في رابطة المعقد باتجاهها بعيدا عن نواة الحديد. فيزيد هذا التأثير الشحنة الموجبة للحديد في مركز الحفاز TAML جاعلا المركب الانتقالي المتفاعل (RI) على درجة من التفاعل كافية لاستخلاص الإلكترونات من الجزيئات القابلة للتأكسد الموجودة في المحلول. لكن لم نستطع بعد معرفة كيف يحطم المركب الانتقالي المتفاعل (RI) الروابط الكيميائية للأهداف التي يهاجمها، إلا أن الأبحاث الجارية قد تعطي قريبا الإجابة. ونحن نعرف أننا نستطيع تعديل قوة الحفاز TAML عن طريق تغيير الذرات الموجودة عند رأس الجزيء وذيله، واضعين عناصر ذات كهرسلبية عالية جدا في هذين الموضعين فتنفرغ شحنة سالبة أكثر من الحديد ويصبح المركب المتفاعل أكثر شراسة.

مصدر القوة الصناعية[*]

إن بناء المركبات TAMLs في المختبر شيء، وتهيئتها لتصبح صالحة للاستعمال التجاري شيء آخر. وتبدو نتائج الفحوص المختبرية والتجارب الميدانية واعدة. فقد بينت الاختبارات التي مولتها مؤسسة العلوم الوطنية أن الحفاز TAML مع البيروكسيدات يمكن أن يزيل التلوث الناجم عن هجوم إرهابي بيولوجي. ووجدنا بالجمع ما بين الحفاز TAML وبيروكسيد هدرو ثالثي البوتيل[2] (نوع آخر من بيروكسيد الهدروجين تُستبدل بإحدى ذرتي الهدروجين فيه ذرة كربون وثلاث زمر ميتيل CH3) أن المحلول الناتج يمكن أن يعطل في 15 دقيقة نحو 99.99999 في المئة من *Bacillus atrophaeus*، وهي نوع من البكتيرات المشابهة جدا للجمرة الخبيثة. ونأمل مستقبلا تحقيق تطبيق محتمل مهم جدا وهو استعمال الحفازات TAMLs الحديدية وبيروكسيد الهدروجين لتوفير معقم رخيص الثمن يستطيع القضاء على الميكروبات المعدية (الخامجة) التي تعيش في المياه والمسؤولة عن الكثير من الأمراض والوفيات في العالم.

لقد قمنا بثلاث تجارب ميدانية لتقصي مدى قدرة الحفازات TAMLs على تخفيف التلوث الناجم عن تصنيع الورق: إذ إن

(*) Industrial Strength
(1) reactive intermediate
(2) tertiatry butyl hydroperoxide

صناعة الورق وعجينة الورق تنتجان سنويا أكثر من 100 مليون طن متري من العجينة المبيضة التي تتحول إلى ورق أبيض. وتطلق عدة مصانع هذه العجينة إضافة إلى الديوكسينات والكلوروفينولات و**الكلورينات العضوية** organochlorines الأخرى، سائلا بلون القهوة يصبغ الجداول والأنهار ويمنع الضوء من التغلغل ضمن المياه. ويؤثر نقص كمية الضوء هذا في التركيب الضوئي، ويؤثر ذلك بدوره في المتعضيات الحية التي تعتمد على النبات في غذائها. وتعود مشكلة التلون إلى وجود كسرات كبيرة ملونة من الليگنين، وهو البوليمير الذي يربط خيوط السيللوز في الخشب. يؤدي التبييض باستعمال ثنائي أكسيد الكلور إلى إزالة الليگنين من السيللوز. فتهضم البكتيرات والمتعضيات الحية الأخرى كسرات الليگنين الصغيرة في أحواض المعالجة. وأما القطع الأكبر فلا يجري أكلها لكبرها وينتهي بها المطاف إلى الأنهار والبحيرات.

قمنا باختبار فعالية الحفازات TAMLs الحديدية في إزالة لون تلك الكسرات في مصنعين لعجينة الورق في الولايات المتحدة ومصنع واحد في نيوزيلندا. وفي نيوزيلندا جمعنا الحفازات TAMLs الحديدية والبيروكسيد مع 000 50 ليتر من الماء المقذوف. أما في الولايات المتحدة فقد حقنا بشكل مباشر الحفازات TAMLs الحديدية في برج معالجة العجينة أو في أنبوب الخروج عدة أيام بغية تبييض النفاية المائية. ووجدنا إجمالا أن الحفازات TAMLs الحديدية خفضت تلون المياه بنحو 78 في المئة وأزالت 28 في المئة من الكلورينات العضوية.

وكذلك يبدو مثيرا تطوير تطبيقات أخرى للحفاز TAML. فقد وجد «E» جايجر» [من منظومات Urethane Soy وهي شركة توجد في الفولكا، جنوب داكوتا] أن الحفازات TAMLs الحديدية تستطيع بشكل ممتاز تحويل زيت فول الصويا إلى بوليميرات مفيدة تتصف بخواص فيزيائية تساوي - إن لم تكن تتفوق على - خواص منتجات البولي يوريتان الراهنة. ويمكن أن تشق الحفازات TAMLs طريقها للاستعمال في الغسالات الآلية. لقد وجدنا في سلسلة أخرى من التجارب أن إضافة كمية قليلة جدا من الحفاز إلى بعض مساحيق الغسيل تلغي الحاجة إلى فصل الملابس البيضاء عن الملونة في عملية الغسيل، لأن الحفازات TAMLs قادرة على منع انتقال اللون، وذلك بمهاجمة ذرات الصباغ عندما تنفصل عن خيوط القماش الملون وقبل أن تلتصق بنسيج القماش الآخر. ونقوم حاليا بالعمل على تطوير جملة جديدة من الحفازات TAMLs قادرة على كسر الروابط الجزيئية المستقرة جدا التي تمكّن العقاقير والكيميائيات الزراعية من الانتقال من دون تغيير إلى مياه الشرب.

ولكننا لم نستطع حتى الآن، على الرغم من نجاح تلك التجارب، الوصول إلى الإجابة عن جميع الأسئلة التي تتعلق بالحفازات TAMLs، إذ يتعين إجراء المزيد من الاختبارات التي تتعلق بالتهيئة الصناعية، إضافة إلى أهمية التأكد من أن الحفازات TAMLs لن تنتج بعض أشكال التلوث التي لم نستطع اكتشافها بعد. فغالبا ما تبدو التقانات الكيميائية سليمة جدا عندما تسوق أول مرة، ولا تصبح عواقبها السلبية المدمرة واضحة إلا بعد مرور عقود من الزمن على استعمالها. ونحن نريد أن نفعل ما بوسعنا لتجنب أي مفاجآت قد تخفيها الحفازات TAMLs.

والتكلفة هي أيضا قضية يجب بحثها. فمع أن الحفازات TAMLs تبدو واعدة في معظم تطبيقاتها، فقد قامت الشركات الكبيرة باستثمارات هائلة في العمليات الكيميائية الصناعية التي تستخدمها حاليا. فالتحول إلى أنظمة وتقنيات جديدة، حتى لو كانت مفيدة، يتطلب استثمارات ليست بالقليلة. ويمكن القول إن إحدى الفوائد العظيمة لتقانة الحفازات TAMLs تتمثل في كونها لا تتطلب تغييرات أساسية في التجهيزات. وأكثر من ذلك فإن الحفازات TAMLs يمكنها في النهاية أن توافر المال على الشركات من خلال تقديمها طريقة منخفضة التكلفة تلبي التزايد المستمر في صرامة القوانين البيئية في الولايات المتحدة وأوروبا وبقية العالم.

إن ما نشهده اليوم من تقدم في الكيمياء الخضراء، لا يمثل سوى خطوات على الطريق المؤدي إلى التعامل مع التحديات البيئية للقرن الحادي والعشرين. ويبقى السؤال الأعمق: هل نحن متجهون نحو ممارسة العناية المشددة أم الطب الوقائي؟ في الوقت الحاضر مازال معظم الكيميائيين مدربين على اختراع مركبات أنيقة البنية تستطيع أن تحل المشكلة المحددة التي هندست من أجلها، من دون الأخذ بالحسبان تأثيرها الأوسع. أما نحن فنقوم في الواقع بإنجاز تجارب عالمية النطاق على نُظمنا البيئية وعلى أنفسنا، وإذا ما فشلت هذه التجارب فإن الثمن سيكون كارثيا. وتقدم تقنيات الكيمياء الخضراء الجديدة البديل. لقد تكشفت الثورة الصناعية وتوضحت في معظمها من دون تقديم هدف أو رؤية مستقبلية. وربما يكون بمقدورنا حاليا اتخاذ بعض الخطوات الخلاقة لعكس هذا الاتجاه والمساعدة على صنع عالم ومستقبل يمكن أن نعيش فيه. ■

المؤلفان

Terrence J. Collins - Chip Walter

يعملان معا على تثقيف الجمهور في التحديات والإمكانات التي تمتلكها الكيمياء الخضراء. «كولينز» هو أستاذ توماس لورد في الكيمياء بجامعة كارنيكي ميلون، وهو مدير مؤسسة كيمياء الأكسدة الخضراء فيها، وهو كذلك أستاذ شرف في جامعة أوكلاند بنيوزيلندا. أما «والتر» فهو صحافي في العلوم ومؤلف كتاب عصر الفضاء وأنا أعمل على ذلك (مع «W. شاتنر»)، ويدرّس موضوع الكتابة العلمية في جامعة كارنيكي ميلون وهو نائب رئيس الاتصالات في المركز الطبي لجامعة بيتسبرگ.

مراجع للاستزادة

Toward Sustainable Chemistry. Terrence J. Collins in *Science*, Vol. 291, No. 5501, pages 48-49; January 5, 2001.

Rapid Total Destruction of Chlorophenols by Activated Hydrogen Peroxide. Sayam Sen Gupta, Matthew Stadler, Christopher A. Noser, Anindya Ghosh, Bradley Steinhoff, Dieter Lenoir, Colin P. Horwitz, Karl-Werner Schramm and Terrence J. Collins in *Science*, Vol. 296, pages 326-328; April 12, 2002.

More information can be found online at **www.cmu.edu/greenchemistry** and **www.chemistry.org/portal/a/c/s/1/acsdisplay.html?DOC=greenchemistryinstitute\index.html**

Scientific American, March 2006

تتمة الصفحة 11 (مقاريب المستقبل العملاقة)

محوره. هذا وإن المقاريب الحديثة مدعومة بقاعدة أشد تراصًا تسمى الارتفاع/السمت[1] (يشير هذا المصطلح إلى حركة ذات بعدين بدلا من الدوران البسيط حول المحور). والظرف غير المواتي هنا هو ضرورةُ استعمالِ آليةِ تحكُّمٍ أشد تعقيدا. لكن الحواسيب جعلتها أسهل تناولا. لكنْ حتى بوجود قاعدة الارتفاع/السمت، يتطلب المقراب الذي قطره 100 متر قبة باهظة الثمن. أضف إلى ذلك أنّ المحاكيات الحاسوبيّة توحي بأن كل بنية ضخمة قد تولّد جيبا خاصا من الاضطراب الهوائي. لذا لن يتطلبَ المقراب OWL سوى سقفٍ منزلقٍ ليغطيه خلال النهار أو في الطقس السيئ. وسيعمل المقرابُ في الهواء الطلق، ويستطيع تحمُّلَ رياحٍ معتدلة الشدة تصلُ سرعتُها إلى 15 مترا في الثانية (نحو 30 ميلا في الساعة). وفي الحقيقة، يخفض النسيم الثابت الاضطرابَ الهوائيّ.

قد تبلغ تكلفة المقراب OWL، الذي حجمه (أي قطر مرآته الأولية) 100 متر، قرابة 1.2 بليون دولار. أما تكلفة المقراب TMT فتقدر بنحو 700 مليون دولار، وتكلفة المقراب GMT تقدر بنحو 400 مليون دولار. هذا وإن كلَّ مبلغٍ يصل إلى نحو بليون دولار يظلّ أقلّ مما تتطلبه معظم التجارب الفضائية. لكنه يبقى مع ذلك مبلغا كبيرا من المال. ومن المحتمل أنّ التعاونَ الدوليَّ سيكون ضروريا لتوفيره.

البانوراما الفلكية[*]

كان العقد الماضي عصرا ذهبيا لعلم الفلك، لكننا نتوقع حدوث المزيد من التقدمات حتى عام 2015. **فالمكشافات** detectors المبتكرة والبصريات التكيفية ستعزز قدرات الجيل الحالي من المقاريب التي تراوح أقطارها ما بين 8 و 10 أمتار، وهذا يشبه، إلى حد بعيد، ما أضافته آلات التصوير والمطيافات[2] الجديدة من قدرات إلى مقراب هبل. وستكون آلات قياس التداخل[3] قد تطورت من حيواناتٍ غريبة إلى أحصنة شُغْل تتعقَّب أجراما ذات ضوءٍ باهتٍ جدا يصل ميزُها إلى جزءٍ من ملّيثانية قوسية[4]. وسيكون المقراب JWST، المتخصص بالأرصاد تحت الحمراء، قد أُطلِق. كما سيكون الصّفيف Atacama Large Millimeter Array قد بدأ عمله بدستاتٍ من هوائيات الأطباق[5]، وهذا يمثّل جسرا بين علم الفلك تحت الأحمر وعلم الفلك الراديويّ. وربما يكون الفلكيون عاكفين على بناء المشروع Square Kilometer Array لاكتشاف الموجات الراديويّة المنخفضة التردّد، وهي منطقة من الطيف الكهرمغنطيسي لم تُكْتَشَفْ إلا بقدرٍ محدودٍ جدا.

بعد إنجاز هذه التقدّمات جميعها، فهل يحتاجُ الفلكيون حقا إلى مقاريبَ ضوئية عملاقة جديدة؟ الجواب هو، وبصوتٍ عالٍ، نعم! فثمة مواضيع علميّة حاسمة لا يمكن التصدّي لحلّها بآلاتٍ صغيرة، مثل: دراسة الكواكب الموجودة خارج المنظومة الشمسية، والمكوّنات الأساسية للنجوم والمجرات. وفيما يتعلق بالضوء المرئي وتحت الأحمر القريب، فإن المقاريب المقامة على الأرض توفر حساسية وميزا عاليين بتكلفة أخفض مما تتطلبه المراصد الفضائية.

إن عملية اختيار مقاربة من المقاربات المختلفة المتجسدة في المقاريب GMT، TMT، OWL ليست بالمهمة السهلة، فلكلٍّ منها ميزاته وعيوبه. وحديثا، توصلت لجنة دولية كُلِّفَتْ بمراجعة مفهوم المقراب OWL إلى أنه عملي، لكنه ينطوي على مجازفة من الناحيتين التقنية والمالية. وحاليا، أعكف مع زملائي، بمساعدة مجموعة كبيرة من الفلكيين، على وضع تصميمٍ مشتركٍ أصغر. ومن المتوقّع صدور قرار بهذا الشأن بحلول نهاية هذا العام. ومن ثَمّ فالمشاريع المختلفة قد تكون متقاربة بعضها من بعض. وبوجه خاص، فإن المقراب TMT ذاته هو نتيجةُ دمجِ عدة تصاميم سابقة.

وعلى مدى قرون، تطوّر كِبَرُ المقاريب التي كانت في البداية بحجم طاولة صغيرة توضع بجانب السرير، ثم صارت بحجم الغرفة، ثم البيت، ثم الكاتدرائية، والآن بحجم ناطحة سحاب. وبفضل التقدمات التقانية الحديثة، يمكننا بناء آلات قادرة على رؤية أول نجومٍ وُلِدَتْ في الكون والكواكبِ المحيطة بنجومٍ أخرى، ومن المحتمل أن يكون ضمنَها كواكبُ شبيهة بأرضنا. ولم يَعُدِ السؤالُ يدور حول قدرتنا على بناء مقاريب عملاقة أو حول سبب رغبتنا في بنائها، إنما السؤال المطروح يتعلق بوقت بنائها وبحجمها. ■

(*) The Astronomical Panorama
(1) altitude/azimuth
(2) spectrometers
(3) interferometry
(4) submilliarcsecond
(5) dish antennas

المؤلف

Roberto Gilmozzi

باحث رئيسي في المجموعة التي تعكف على دراسة تصميم المقراب OWL. شغل بين عامي 1999 و 2005 منصب مدير المرصد Very Large Telescope Observatory المقام في سيرو بارانال بجمهورية تشيلي. وتتضمن اهتماماتُه العلميّةُ دراسة المستعرات والمستعرات الأعظمية وبقاياها وإشعاع الخلفية الكونية للأشعة السينية وتاريخ التكوّن النجمي في الكون.

مراجع للاستزادة

OWL Concept Study. R. Gilmozzi and P. Dierickx in *ESO Messenger*, No. 100, pages 1–10; June 2000. Online at **www.eso.org/projects/owl/publications/2000_05_Messenger.htm**

Astrophysical Techniques. Fourth edition. C. R. Kitchin. Taylor & Francis, 2003.

Proceedings of Second Bäckaskog Workshop on Extremely Large Telescopes. Edited by A. L. Ardeberg and T. E. Andersen. *Proceedings of the SPIE*, Vol. 5382; July 2004.

The Light Brigade. Neil deGrasse Tyson in *Natural History*, Vol. 115, No. 2, pages 18–29; March 2006.

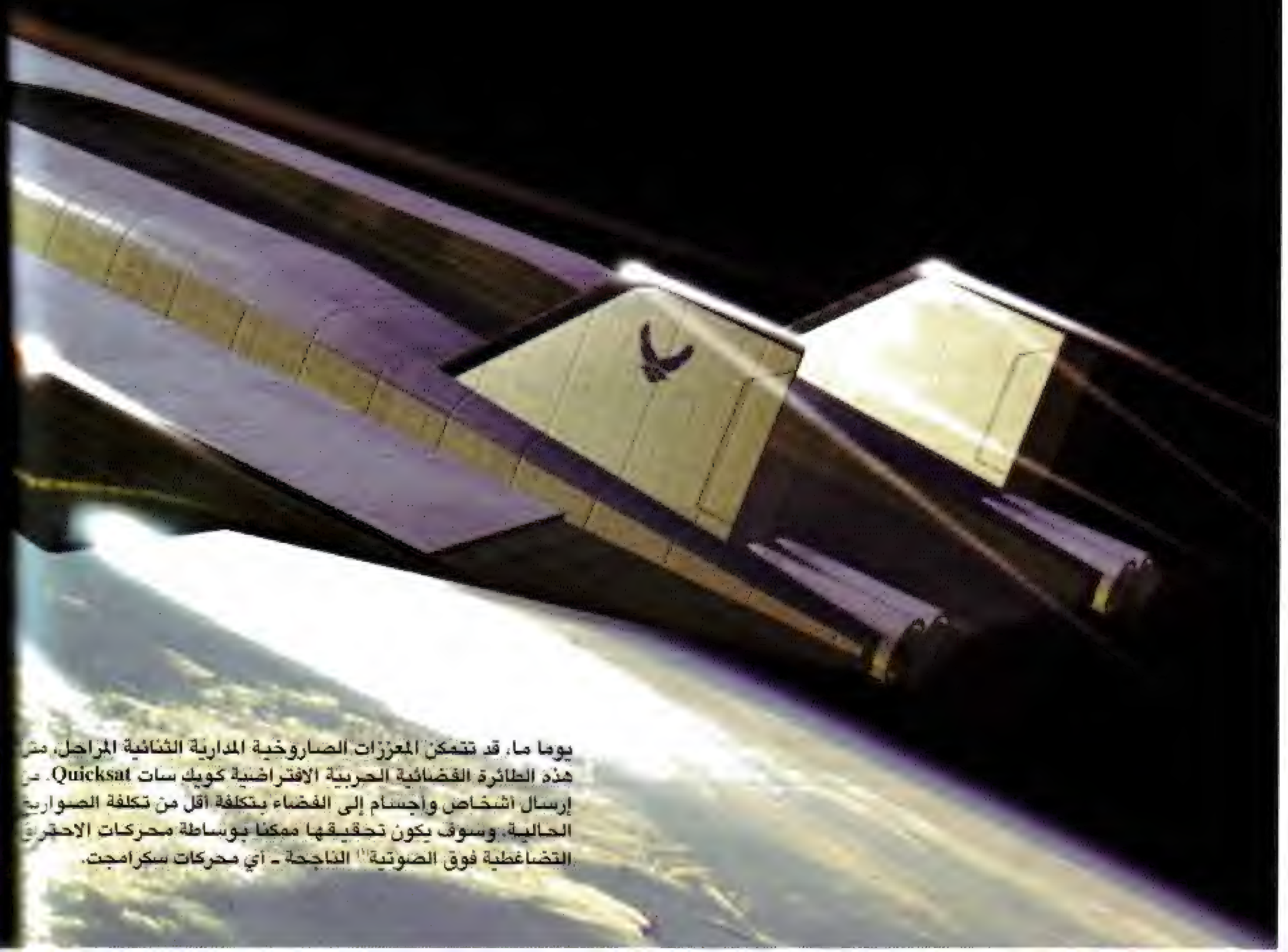
Exploring the Cosmic Frontier: Astrophysical Instruments for the 21st Century. ESO Astrophysics Symposia. Springer-Verlag (in press). **www.mpifr-bonn.mpg.de/berlin04/**

Scientific American, May 2006

طاقة لدفع طائرة فضائية[*]

إن ابتكار محرك نفاث متطور قادر على دفع طائرة فضائية إلى مدارها بطريقة روتينية وبتكلفة معقولة هي مهمة صعبة، لكنها على ما يبدو قابلة للنجاح.

<Th. A. جاكسون>



يوما ما، قد تتمكن المعززات الصاروخية المدارية الثنائية المراحل، مثـ
هذه الطائرة الفضائية الحربية الافتراضية كويك سات Quicksat، مـ
إرسال أشخاص وأجسام إلى الفضاء بتكلفة أقل من تكلفة الصواريـ
الحالية. وسوف يكون تحقيقها ممكنا بوساطة محركات الاحترا
التضاغطية فوق الصوتية[1] الناجحة ـ أي محركات سكرامجت.

منذ مدة طويلة، يطمح المهندسون إلى بناء طائرة يمكنها أن تنطلق من مدرج وتحلق عاليا، ثم تعود ثانية إلى الأرض - على غرار ما تفعله طائرة لوك سكايووكر Luke Skywalker المقاتلة المتصالبة الجناحين (بشكل الحرف X) في سلسلة أفلام «حرب النجوم». إلا أن أمرا واحدا كان يعترض سبيلهم: إن المحركات النفاثة تحتاج إلى الأكسجين لحرق الوقود، في حين لا يوجد في طبقات الجو العليا كمية كافية منه لاستدامة عملية الاحتراق. لذا فإن الطيران نحو الفضاء يتطلب دفعا صاروخيا لحمل كل من الوقود والمادة المؤكسدة على متن المركبة. وحتى في مكوك الفضاء الذي يعتبر أكثر أنظمة الإطلاق الحالية تطورا، فإن قرابة نصف الوزن عند الإطلاق يكون مخصصا للأكسجين السائل والمادة المؤكسدة الصلبة، اللذين يجب نقلهما إلى الجو لمواصلة عملية احتراق الوقود الصاروخي طوال الرحلة إلى المدار المحدد.

يمكن أن يقدم المحرك النفاث التضاغطي فوق الصوتي (الفوصوتي)[1]، المعروف باسم محرك سكرامجت scramjet، أحد الحلول لهذه المسألة، وهو محرك يمكنه أن يغترف الاكسجين من الغلاف الجوي أثناء مرحلة الصعود. ويعني اختصار بعض الوزن نتيجة سحب الهواء خلال مدة الطيران عوضا عن حمله من الأرض، أن يصبح محرك سكرامجت قادرا على توليد دفع يعادل أربعة أضعاف الدفع الذي يولّده أي صاروخ لكل باوند من وزن وقود الدفع المستهلك. وأخيرا، يبدو أنه أصبح بالإمكان، بعد مضي عقود من التطوير المتواصل، الاعتماد على محركات سكرامجت المستخدمة لمباشرة مرحلة الطيران. ويخطط الباحثون للقيام بين عامي 2007 و 2008 باختبارات حاسمة على الأرض لهذه المحركات بحجمها الطبيعي، فضلا عن عزمهم في عام 2009 على القيام بسلسلة من الاختبارات أثناء الطيران، الهدف منها تحطيم بعض الأرقام القياسية

وبخلاف الصاروخ الذي يخترق الجو مباشرة نحو المدار يُفترض أن الطائرة، التي تسيرها محركات سكرامجت، سترتفع في الجو مثل اي طائرة عادية، مستخدمة قوة الرفع التحريكي الهوائي[2] التي يولدها جناحاها وجسمها، وهذا يجعلها أكثر

(*) POWER FOR A SPACE PLANE

(1) supersonic combustion ramjet

[illegible]

قدرة على المناورة وأكثر أمانا (فإذا حدث عطل في محركاتها، فإن المركبة تستطيع الهبوط إلى الأرض من دون الاستعانة بمحركات). ويُفترض أن هذه الطائرة تُقلع من الأرض، وتبلغ سرعات فوق صوتية باستخدام المحركات النفاثة التقليدية (بداية السرعات فوق الصوتية هي 1 ماخ، أي 760 ميلا في الساعة عند مستوى سطح البحر). ويُفترض بعدئذ أن تتولى محركات سكرامجت زمام الأمور، وتدفع الطائرة لبلوغ السرعات فوق الصوتية ـ من 5 ماخ إلى 15 ماخ (الحد النظري لأداء محرك سكرامجت) أخيرا، يُفترض أن تقوم محركات صاروخية صغيرة بتسريع الطائرة، مع حمولتها الإجمالية، على طول المسافة المتبقية إلى المدار. والمعروف أن سرعة 5 ماخ تعادل خمسة أضعاف سرعة الصوت، أي زهاء ميل واحد في الثانية. وعلى سبيل المقارنة، فإن أسرع طائرة مأهولة تعمل بسفط الهواء[1]، وهي طائرة **بلاك بيرد SR-71** Blackbird التابعة لسلاح الجو الأمريكي، لم تتمكن من تخطي سرعة مقدارها 3.2 ماخ تقريبا.

وقد تؤدي مثل هذه القدرات إلى حصول ثورة في عالم الطيران. فقدرة طائرة فضائية على الطيران مثل أي طائرة عادية، قد تسهم نسبيا في جعل هذا النوع من الرحلات أمرا روتينيا، وتُفضي بذلك إلى إحداث انخفاض كبير في تكاليف إرسال الأشخاص أو الأشياء إلى مدار حول الأرض. كما أن الأداء الهائل لهذا المحرك الجديد سوف يمكن الطائرة الحربية، أو الصاروخ، من إلقاء القنابل فوق أي هدف على الأرض، مهما كان موقعه وذلك خلال وقت أسرع بكثير مما هو ممكن في الوقت الحاضر. حتى إن محركات سكرامجت قد تتمكن يوما ما، من تسيير طائرات ركاب فوق صوتية بعيدة المدى، متيحة بذلك الفرصة، مثلا، لقطع المسافة بين مدينتي نيويورك وسيدني خلال ساعتين.

وهناك عدد كبير من مجموعات البحث المنتشرة في كافة أنحاء العالم، التي تعمل على مواجهة التحديات التقنية الهائلة، المتعلقة بتحقيق طيران فوق صوتي بوساطة محركات سكرامجت. وسوف أركز في مقالتي هذه على برنامج محركات سكرامجت، الذي ينفذه سلاح الجو الأمريكي والشركة برات آند ويتني للتقانة فوق الصوتية Pratt & Witny Hypersonic Technology (برنامج هايتك HyTeck)، وهو البرنامج الذي اظن أني خبرته أكثر من سواه. وهناك جهود حثيثة كثيرة أخرى في التطوير، تقوم بها حاليا كل من البحرية الأمريكية ووكالة الفضاء الأمريكية (NASA) ووكالة مشاريع الأبحاث الدفاعية المتقدمة (DARPA)، إضافة إلى فرق هندسية تعمل في أستراليا والمملكة المتحدة واليابان وفي أمكنة أخرى من العالم [*انظر الجدول في الصفحة* 58].

يوما ما، قد تتمكن محركات سكرامجت من تسيير طائرة ركاب بين نيويورك وسدني في مدة لا تتجاوز ساعتين.

نظرة إجمالية/ المحركات فوق الصوتية[*]

- **تستطيع محركات الاحتراق التضاغطية فوق الصوتية، أو محركات سكرامجت، أن تدفع الصواريخ وغيرها من الأسلحة والطائرات الفضائية، وحتى طائرات الركاب البعيدة المدى، بسرعات فوق صوتية ـ من 5 إلى 15 ماخ (يساوي 1 ماخ سرعة الصوت، أي ما يعادل 760 ميلا في الساعة عند مستوى سطح البحر).**
- **تقوم محركات سكرامجت بسفط الهواء ومزجه في الوقود، ثم تحرق المزيج لتوليد دفع دسري[2] هائل. وهي، خلافا للصواريخ، ليست بحاجة إلى حمل الأكسجين ومادة مؤكسدة، وبذلك تحقق انخفاضا في الوزن وتعطي نسبة دفع أكبر أربع مرات لكل وحدة من وزن المادة الداسرة.**
- **على الرغم من التصميم البسيط لمحرك سكرامجت ـ إذ إنه لا يحتاج إلى عجلات توربينية دوارة ـ فإن التحديات التقنية التي يفرضها صنع محرك قادر على العمل في أنظمة طيران مختلفة ولفترات زمنية طويلة، تعترضها عقبات شتى**

الطريق إلى الطيران[**]

لا يُعد محرك سكرامجت مفهوما جديدا في تقانة الدفع. ويعود تسجيل أولى براءات الاختراع الخاصة به إلى الخمسينات من القرن العشرين. وفي أواسط الستينات، أُجريت عدة اختبارات في مرافق على الأرض لعدد من محركات سكرامجت بسرعات بلغ أقصاها 7.3 ماخ. كذلك، قامت شركات جنرال إلكتريك ويونايتد تكنولوجيز[3] وماركارت[4] ومختبر الفيزياء التطبيقية في جامعة جونز هوبكنز ومركز أبحاث لانگلي التابع للوكالة ناسا (NASA)، ببناء محركات تعمل، بشكل أساسي، على حرق الهدروجين (وهو نفس الوقود المستخدم في صواريخ الدفع في مكوك الفضاء وفي عدد كبير من المعززات الصاروخية التي تعمل بالوقود السائل). وفي أواسط الثمانينات، أطلقت حكومة الولايات المتحدة الأمريكية برنامج **الطائرة الفضائية الوطنية** National Aerospace Plane، التي تسير بوساطة محركات سكرامجت. غير أن المشروع أُلغي في عام 1994 بعد أن ناهز حجم الأموال الموظفة فيه بليوني دولار، وذلك كجزء من إجراءات تخفيض الميزانية الذي نفذ بعد انتهاء الحرب الباردة. وفي عام 2004، أكملت وكالة الفضاء الأمريكية برنامجها المسمى Hyper-X، عندما نجحت طوال بضع ثوان في تشغيل محركين من نوع سكرامجت يعملان بوقود الهدروجين، لكل منهما سرعة وارتفاع محددان. وفي أواخر العام نفسه، سجلت مركبة البحث X-43A المزودة بمحرك سكرامجت، سرعة قياسية بلغت قيمتها 9.6 ماخ [*انظر الإطار في الصفحة* 59]. وتنصب جهود سلاح الجو الأمريكي حاليا على استخدام تقانة الجيل الجديد من محركات سكرامجت بغية تسريع المركبة لبلوغ مدى معين من السرعات والارتفاعات

(*) Overview/ Hypersonic Engines
(1) air breathing
(2) propulsive thrust
(3) United Technologies
(4) Marquardt
(**) The Road to Flight

فئة من محركات الطيران(*)

تنتمي محركات سكرامجت إلى فئة المحركات النفاثة. التي تعمل وفقا لمبادئ مماثلة. وعموما يولّد كل محرك دفعا دسريا بوساطة ضغط الهواء الداخل، ومزجه في الوقود، ثم حرق المزيج وطرد نواتج الاحتراق من طرفه الخلفي.

محرك سكرامجت (من 4.5 إلى 15 ماخ)



يدخل الهواء بسرعة فوق صوتية من منفذ الدخول، حيث يسبب المسار المتضيق للدفق تضاغطا ram للهواء - أي تباطؤه وانضغاطه، ومن ثم تحويل جزء من طاقته الحركية إلى حرارة. تضخ المحاقن (البخاخات) الوقود في الهواء داخل غرفة الاحتراق، حيث يبدأ المزيج الذي مازالت سرعته فوق صوتية بالاحتراق بسرعة. فتتحول طاقة الوقود الكيميائية إلى طاقة حرارية. يعمل المسار الداخلي المنضغط على احتباس المزيج المنتفخ الذي تكون درجة حرارته مرتفعة، فترتفع قيمة ضغطه أكثر. وعندما تصل الغازات المنبعثة إلى الفوهة، حيث يصبح المسار أعرض، تتمدد الكتلة وتتسارع متجهة إلى الخارج، وتتحول طاقتها الحرارية إلى طاقة دفع حركية.

محرك رامجت (2.5 إلى 5 أو 6 ماخ)



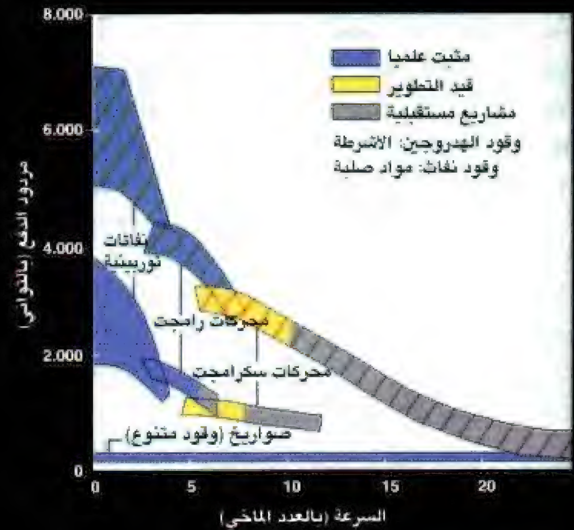
يشبه عمل المحرك النفاث التضاغطي (رامجت) عمل محرك سكرامجت، إلا أن دفق الهواء الداخلي فيه يبقى بسرعات دون صوتية.

محرك نفاث توربيني (0 إلى 3 ماخ)



لما كان المحرك النفاث التوربيني يسير بسرعة أبطأ، فإنه يحتاج إلى عجلات توربينية دوارة لضغط الهواء الداخل وتوليد قوة الدفع.

نوافذ الأداء



يكون تصميم كل محرك مناسبا على أفضل وجه لمجموعة من ظروف سرعة المركبة وارتفاعها. ويوفر وقود الهدروجين أداء أفضل للمحرك، لكنه يطرح بعضا من المشكلات المتعلقة بتعبئته في حيز صغير، وبالبنية التحتية الحالية لتوزيع الوقود. أما الوقود النفاث الهدروكربوني، فإن التعامل معه أسهل، لكنه يعطي مقدارا أقل من الطاقة لكل وحدة وزن. والمعروف أن مردود الدفع، وهو قياس للفعالية النسبية للمحرك، يساوي الدفع النفاث لكل وحدة وزن من معدل دفق الوقود الداسر.

(*) A Family of Flight Engines

بعض برامج البحث والتطوير في مجال محركات سكرامجت(*)

إضافة إلى برنامج هايتك HyTeck وبرنامج المركبة الإيضاحية لمحرك سكرامجت X-51A التابعين لسلاح الجو الأمريكي [*انظر المقالة الرئيسية*]، هناك محاولات بحثية وطنية ودولية أخرى تهدف إلى تطوير تقانة محركات سكرامجت.

البرنامج	المواعيد	المؤسسة	الإنجازات
Hyper-X	2004-1996	ناسا	انصبت الجهود في مشروع Hyper-X (X-43A) على تسيير مركبات اختبارية لإثبات عمل محركات سكرامجت، التي تعمل بالهدروجين. ... أحد الاختبارات أثناء الطيران بلغت سرعة المركبة X-43A قرابة 10 ...
HyShot	2001 ـ حتى وقتنا الحاضر	جامعة كوينزلاند في أستراليا [بدعم من شركاء آخرين في أستراليا والمملكة المتحدة وألمانيا وكوريا الجنوبية واليابان]	في الشهر 2002/7، أجرى فريق HyShot أول اختبار ناجح من نوعه ... الطيران لمحرك سكرامجت. وقد طار باتجاه الأسفل بسرعة بلغت نحو ... ماخ مدة ست ثوان.
البرنامج الإيضاحي للطيران فوق الصوتي (HyFly)	2002 ـ حتى وقتنا الحاضر	وكالة الأبحاث الدفاعية المتقدمة (DARPA) ومكتب الأبحاث البحرية (ONR)	يقوم البرنامج HyFly بصنع صاروخ من نوع كروز يسير بمحركات رامجت أو سكرامجت. وقد طور مختبر الفيزياء التطبيقية في جامعة ... هوبكنز هذا المحرك لاستخدامه في الطائرة المزودة بمعززات صاروخية ...
تقنية اختبار سكرامجت في الطيران الحر في الفضاء (FASTT، بإشراف المشروع HyFly)	2003 ـ حتى وقتنا الحاضر	Alliant Techsystems (بدعم من الوكالة DARPA والمكتب ONR)	في 2005/12/10، بلغت المركبة المزودة بمحرك سكرامجت، الذي يعمل بوقود الكيروسين سرعة قدرها 5.5 ماخ خلال طيران مدته 15 ثانية
Falcon	2003 ـ حتى وقتنا الحاضر	الوكالة DARPA	ينص برنامج فالكون على بناء طائرة حربية فوق صوتية بدون طيار تستطيع أن تبلغ أي نقطة على كوكب الأرض في غضون ساعتين. ... يكون لهذه التقانة، في نهاية المطاف، تطبيقات غير عسكرية، ويُحتمل ... تسهم في تطوير طائرة فضائية مدارية أحادية المرحلة.

وتزويد المحرك بوقود الهدروكربون السائل والاستعانة بنفس الوقود لتبريد هيكل المحرك.

تنتمي محركات سكرامجت إلى فئة يُطلق عليها اسم المحركات النفاثة التي تعمل بسفط الهواء والتي تتوقف المجالات المتنوعة للسرعات والارتفاعات التي تعمل فيها على تغييرات في مبدأ أساسي من مبادئ توليد الدفع. وبوجه عام، تعمل المحركات النفاثة عن طريق ضغط الهواء الجوي، ومزج هذا الهواء في الوقود، وحرق المزيج، ثم طرد نواتج الاحتراق من مؤخر المحرك لتوليد قوة الدفع. والمعروف أن معظم طائرات الركاب العادية والتجارية تسير بوساطة محركات توربينية غازية تتضمن المكونات الأساسية الخمسة التالية: **منفذ دخول الهواء** air in take؛ وضاغط (وهو عجلة مؤلفة من عدد من سطوح الانسياب الهوائية المركبة حول محور للدوران) مهمته سفط الهواء وزيادة ضغطه؛ و**غرفة احتراق** combustor يجري فيها حقن الوقود وحرقه؛ وعجلة توربينية تدور عندما تتدفق غازات الاحتراق الساخنة عبر سطوحها الانسيابية فيدور معها محور عجلة الضاغط؛ وفوهة تندفع من خلالها الغازات المنبعثة الشديدة الحرارة لتوليد قوة الدفع. وباستطاعة المحركات النفاثة التوربينية الحالية أن تزود الطائرة بطاقة تمكنها من بلوغ سرعات أعلى من 3 ماخ بقليل [*انظر الإطار في الصفحة 57*]. أما في السرعات التي هي أكثر ارتفاعا، فإن المكونات التي تدور تصبح معرضة للتلف الناجم عن التسخين المفرط الذي تتعرض له.

عندما تتجاوز قيمة السرعة 2.5 ماخ تقريبا، لا يعود المحرك النفاث بحاجة إلى ضاغط أو توربين إذا كان تصميمه يسمح بتعرض الهواء الذي يدخل فيه لعملية **تضاغط** ram-compression؛ لذلك لا يوجد في المحرك التضاغطي (رامجت) إلا منفذ لدخول الهواء وغرفة للاحتراق وفوهة [*انظر الإطار في الصفحة 57*]. يقوم منفذ الدخول الذي يصمم خصوصا لمحرك رامجت، بتكييف ضغط الهواء، وفي الوقت نفسه بإبطاء سرعته إلى سرعات دون صوتية. وتقوم **المحاقن (البخاخات)** injectors بضخ الوقود إلى دفق الهواء، ومن ثم يشتعل مزيج الهواء والوقود ويحترق. وتتسارع غازات الانفلات[1] الساخنة من جديد إلى أن تبلغ سرعة الصوت تقريبا عند مرورها عبر عنق ضيق، يسمى الخانق الميكانيكي[2]، ثم تندفع بعد ذلك من خارج الفوهة المخروطية الشكل بسرعات فوق صوتية. وفي الوقت الذي يرتفع فيه **العدد الماخي** Mach number للطائرة إلى أكثر من 5، يؤدي تباطؤ الهواء في منفذ الدخول إلى ارتفاع درجة الحرارة داخل المحرك إلى نقطة يصعب معها زيادة المردود الحراري زيادة فعّالة عن طريق الاحتراق. ولهذا السبب، تعتبر السرعة التي تقع بين 5 ماخ و6 ماخ الحد العملي لعمل محرك رامجت.

التركيب الداخلي لمحرك سكرامجت(**)

كي يتمكن محرك سكرامجت من توليد دفع دسري أكبر من الدفع الذي يوافره محرك رامجت، وكي يعمل بسرعة طيران أعلى من سرعته، يجب أن تنخفض فيه قيمة الانضغاط الأولي لدفق الهواء، بحيث لا تتباطأ سرعته بنفس المقدار تقريبا - في الحالة المثالية، يحافظ المحرك على سرعة فوق صوتية طوال عملية الاحتراق. وعلى غرار محرك رامجت، لا يوجد في محرك سكرامجت قطع متحركة في مسار دفق الهواء؛ إذ إنه مكون، أساسا، من أنبوب

(*) Selected Scramjet R&D Programs
(1) exhaust gases
(**) Anatomy of a Scramjet
(2) mechanical choke







تتوافر محركات سكرامجت بأشكال مختلفة، لكنها تحتاج جميعها إلى صواريخ تمكنها من بلوغ سرعة تجعلها قادرة على الإقلاع. فمركبة البحث X-43A ـ التابعة للوكالة ناسا، التي تشبه الطائرة العادية [*في الأعلى*] والتي سجلت في الشهر 2004/11 سرعة قياسية لمحرك نفاث يعمل بسفط الهواء (9.6 ماخ، أي زهاء 7000 ميل في الساعة) أطلقت من صاروخ بيكاسوس الخاص بالعلوم المدارية[1]. أما محركات سكرامجت في المشروع هايشوت HyShot، فقد أطلقت من على متن صواريخ تريير أوريون Terrier-Orion [*في أقصى اليمين*]، بنفس الطريقة التي أُطلق بها محرك سكرامجت FASTT ذو التصميم المماثل، والذي يظهر في أحد التطبيقات المستقبلية للصواريخ الحربية [*في الوسط*].

متضيق يتخذ شكل قمعين متصلين في طرفيهما الضيقين [*انظر الإطار في الصفحة 57*] وأثناء التشغيل، يتحول الهواء الذي يدخل بسرعة فوق صوتية من منفذ الدخول (القمع الأول) إلى هواء مكيف الضغط وساخن. وفي منطقة الدفق المتضيق الواقعة في الممر الأوسط (غرفة الاحتراق)، يُحقن الوقود في الهواء المتدفق ويشتعل، وهذا يسبب تسخينا إضافيا للغاز. وتندفع الغازات المتولدة المنفلتة من خارج الفوهة (القمع الثاني) بسرعة فائقة أعلى من سرعة الهواء الداخل إلى المحرك.

ومثلما تفعل بعض أسماك القرش التي تسبح إلى الأمام من دون توقف كي تحافظ على إمداداتها من الأكسجين، يتعين على محرك رامجت، أو محرك سكرامجت، أن يتقدم بسرعة كبيرة لإجبار الهواء على الاندفاع بقوة في منفذ الدخول قبل أن يتمكن من الإقلاع وتوليد قوة الدفع. هذا وإن الحاجة إلى بلوغ لحظة بدء الإقلاع تعني أن مركبة الإطلاق المدارية، التي تسير بوساطة محركات سكرامجت، يجب أن تتضمن نظاما آخر للدفع، كأن يكون صاروخا أو محركا توربينيا غازيا، يمكنها من مباشرة حركتها. وعندما تبلغ المركبة سرعتها المطلوبة، يفترض أن يقوم قائد الطائرة الفضائية بتشغيل محرك سكرامجت لمتابعة الرحلة نحو الطبقات العليا للجو، حيث يتولى أحد الصواريخ إكمال مرحلة الدخول النهائي في المدار. ويعد تصميم نظام للدفع، يجمع بين مختلف دورات المحرك، مسألة من مسائل **الاستمثال** optimization التي تتأثر بعوامل مثل حجم الحمولة الإجمالية والمدار المقصود والمدى والسرعة اللازمين للسفر في الغلاف الجوي والقدرة على نقل الأسلحة.

وتتمثل الصعوبة الرئيسية في عمل محرك سكرامجت بالمدة القصيرة التي يمكث خلالها الهواء داخل المحرك ـ بضعة أجزاء من الملي ثانية. إذ تصبح مهمة حرق الوقود أشبه بإشعال عود ثقاب في عاصفة وإبقائه مشتعلا بطريقة ما. وتكمن البراعة في تشغيل محرك سكرامجت في الهندسة الداخلية المتطورة جدا للأنبوب، وفي تحديد الموقع الذي تطلق منه الحرارة بفعل الاحتراق على طول هذا الأنبوب. فمحرك سكرامجت العملي يولد قوة دفع مستقرة عن طريق التحكم الدقيق في سرعة وضغط الهواء المتدفق عبر المحرك، وعن طريق معايرة كمية الوقود التي تدخل إلى غرفة الاحتراق لكي تحترق بأكملها وتطلق الكمية المطلوبة بدقة من الطاقة. ويُعد الضبط الدقيق للعلاقة بين مساحة الدفق وكمية الحرارة المنطلقة سببا لإلغاء الحاجة إلى وجود خانق ميكانيكي في محرك رامجت، وللسماح لمحرك سكرامجت بالحفاظ على دفق فوق صوتي عبر غرفة الاحتراق.

وفي مجال محركات سكرامجت، يدرك الباحثون أن المعالجة الدقيقة للطاقة الحرارية في المحرك أمر بالغ الأهمية. فالحرارة تتدفق إلى بنية المحرك نتيجة عمليتي الاحتكاك والاحتراق. ويمكن لموجات الصدم الداخلية، التي ترتطم بجدران المحرك، إجراء تضخيم موضعي كبير لهذا التدفق الحراري. فالطاقة الحركية للدفق الهوائي فوق الصوتي الممتص، إذا ما تحولت بكاملها إلى طاقة حرارية، هي أكبر بكثير مما يتطلبه انصهار الهيكل المعدني للمحرك. ومع ذلك، فمن دون درجة كافية من التباطؤ، يقوم الهواء بالانتقال عبر المحرك بسرعة كبيرة وبدرجة حرارة وبضغط شديدي الانخفاض يمنعانه من مؤازرة احتراق الوقود.

ويلجأ المهندسون إلى استخدام طُرُق «التسريد الفاعل» نـ

(1) Orbital Sciences Pegasus



في عام 2009، سوف تقوم مركبة البيان العملي لمحرك سكرامجت X-51A [في الأعلى] بإجراء اختبار أثناء الطيران على تقانة لمحرك سكرامجت وهيكله الهوائي، يشرف عليها برنامج سلاح الجو الأمريكي HyTech. وفي الآونة الأخيرة، استكملت مجموعة من الاختبارات الأرضية على آخر نموذج أولي [*في اليمين*] لمحرك سكرامجت، التابع لسلاح الجو الأمريكي، في نفق مخصص لدرجات الحرارة العالية، يبلغ طوله ثماني أقدام، وذلك في مركز أبحاث الوكالة ناسا في لانكلي. وقد أجرى المهندسون اختبارهم على المحرك وهو مقلوب رأسا على عقب، بغية تحديد خطوط سير الأنابيب والأجهزة عبر القاعدة الواقعة في أسفله

انصهار هيكل المحرك نتيجة لاحتكاك الهواء الناجم عن الدفق فوق الصوتي. وبموجب هذه الطرق، تقوم المضخات بإجبار دفق ثابت من الوقود الماص للحرارة على الاندفاع عبر ممرات تم إنشاؤها في داخل المحرك ومكونات الهيكل، غايتها سفط الحرارة التي يُحتمل أن تسبب تلفا للمحرك. ولهذه العملية فائدة رديفة تتمثل بتهيئة الوقود لعملية احتراق سريع داخل المحرك. وقد جرى تطبيق تقنية التبريد هذه بنجاح طوال عقود على الصواريخ التقليدية، واستخدم فيها الهدروجين السائل مادة للتبريد. ويُعتبر استخدام الوقود الهدروكربوني في مثل هذا الوسط أكثر خطورة لأن الهدروكربون المُجْهد حراريا يمكن أن يتفكك فورا، ويتحول إلى فحم كوك صلب، وهذا يؤدي بدوره إلى انسداد ممرات التبريد. أما العيوب الأخرى فهي أن أنظمة التبريد الفاعل تستلزم وزنا وتعقيدا إضافيين، وأنها يجب أن تظل فاعلة؛ لأن أي نقصان في مادة تبريد الوقود سوف يؤدي إلى فشل بنيوي كارثي.

لذلك يعتبر التشغيل الناجح لمحرك سكرامجت بمثابة فعل توازني دقيق، يزيد من تعقيده أن أي شكل هندسي محدد لدفق الهواء، لا يمكن أن يصل إلى حالته المثلى إلا عند تحقق مجموعة ملائمة واحدة من ظروف الطيران (السرعة، الارتفاع، وهلم جرا). وفي الحالة المثالية، يمكن للأبعاد الفيزيائية ولشكل مسار الدفق في محرك سكرامجت، أن تتكيف باستمرار كلما زادت سرعة المركبة وتغير ارتفاعها. لكن السطوح الداخلية المتحركة المقاومة للحرارة، والوصلات الميكانيكية ذات القدرات المماثلة، مازالت متخلفة عن المواد والبُنى المستعملة حاليا. فالحاجة إلى التحريك المستمر لسطوح المحرك الداخلية الشديدة السخونة، وإلى إحكام إغلاق الممرات لمنع تسرب غازات المحرك المرتفعة الحرارة، مازالت تكوّن عائقا أمام تحقيق جميع القدرات الكامنة لدورة محرك سكرامجت.

دراسة حالة(*)

وعلى الرغم من العقبات التقنية المتأصلة في طبيعة محركات سكرامجت، فقد حقق الباحثون في الآونة الأخيرة نجاحات تبشر بإنجازات واعدة كثيرة في المستقبل. يتمثل أحد هذه النجاحات بتفعيل البرنامج هايتك HyTech، التابع لسلاح الجو الأمريكي، الذي انطلق عام 1995. فقد تركز التعاون في البرنامج هايتك، بين العلماء والمهندسين الحكوميين والصناعيين والجامعيين، على ما كان يمثل، باعتقاد الفريق، جزءا قابلا للمعالجة من التحديات الهندسية لمحرك سكرامجت. وكان تركيز عمل الأعضاء، أولا، على محركات سكرامجت الصغيرة القابلة لزيادة الحجم، كتلك المستخدمة في الصواريخ. ويُفترض في هذا المحرك أن يكون صغيرا بحيث يناسب حجم مرافق الاختبارات المقامة على الأرض، ومن ثم يسهل القيام بتقييم تقني له. ويُفترض فيه أيضا أن يعمل مرة واحدة فقط، مرجئا بذلك حل الصعوبات الإضافية، الناجمة عن تطوير بُنى طيرانية قابلة لإعادة الاستعمال، إلى بحث لاحق. وقد استطاع هذا البرنامج أن يقلل من مستوى التعقيد في التصميم إلى حده الأدنى، عن طريق حصر نطاق التشغيل بين 4 ماخ و 8 ماخ، واعتماد مسار تدفق ذي شكل هندسي ثابت.

ولتشغيل محرك هايتك، وقع أخيرا اختيار أعضاء الفريق على الوقود النفاث JP-7، وهو سائل هدروكربوني جرى تطويره أساسا لبرنامج المركبة بلاك بيرد. وكما أشرنا سابقا، ففي محرك سكرامجت المبرد بالوقود، يؤدي الوقود دور مصرف أو بالوعة حرارية - وهي الوسيلة التي يمكن بوساطتها التحكم في كمية الحرارة الزائدة. ففي أي نظام متوازن حراريا، ينبغي ألا تزيد كمية الوقود، اللازمة لامتصاص الحرارة الفائضة في الهيكل، على كمية الوقود الضرورية لعملية الاحتراق. ويرغب مصممو محرك هايتك في أن يحدث هذا التوازن في سرعة قدرها 8 ماخ، وقد برهن الوقود JP-7 على أن استعماله ملائم جدا في هذه المهمة.

وكي تتمكن وحدة توليد الطاقة، التي تعمل بسفط الهواء، من أن تنافس بجدارة فعالية مركبة إطلاق تعمل بوساطة الصواريخ، فقد بينت الدراسات المتعلقة بالأداء أنها يجب أن تكون قادرة على العمل جيدا عند بلوغ سرعة تعادل نصف سرعتها القصوى تقريبا. ولهذا السبب، سعى المهندسون لبلوغ سرعة قدرها 4 ماخ، واعتباره السرعة التي يبدأ بها إقلاع محرك سكرامجت، علما أنها سرعة صعبة المنال، لأن درجة حرارة الهواء، الذي يدخل إلى حجرة الاحتراق بتلك السرعة هي أدنى بكثير من درجة الحرارة التي

(*) A Case Study

يحدث فيها الاشتعال التلقائي للوقود. لذا فقد يتطلب المحرك وجود عنصر إضافي يساعد على عملية الاشتعال، كأن يكون مادة مضافة كيميائية تخفض درجة حرارة الاشتعال التلقائي للوقود، أو جهازا قادرا على إشعال الوقود عن طريق توليد غاز ساخن جدا وحقنه داخل مزيج الهواء والوقود. أما عند بلوغ سرعات طيران تتجاوز 4 ماخ، فإن اشتعال اللهب وثباته يكونان أسهل بكثير، وذلك إلى حين الوصول إلى سرعات طيران عالية جدا تصبح فيها المدة القصيرة لبقاء الوقود في المحرك عائقا أمام استدامة عملية الاحتراق.

وبحلول عام 2003، كان فريق «هايتك» طور مكونات المحرك، وأدخل فيه أنظمة جزئية تفي بمعظم متطلبات أهداف البرنامج

أن يؤدي إلى فشل كارثي. وهناك مشكلة أخرى مفادها أن عدم التوازن في التمدد الحراري بين المكونات الخزفية والمكونات المعدنية قد يشوه الأشكال الهندسية لمجاري الهواء، ويربك محاولات التحكم في أداء محرك سكرامجت. وقد توصل المهندسون إلى تطوير مادة مقاومة للحرارة مكونة من الكربون ومركبات الكربون ومزودة بوصلات حزٍّ ولسان(1) يمكنها أن تتغلب على هذه المشكلة.

يُعتبر استخدام الوقود JP-7، في تشغيل محرك سكرامجت وتبريده، أساسيا لنجاح المركبة X-51A. وحتى الآن، كان يُنظر إلى الهدروجين على أنه الوقود المفضل لمعظم برامج محركات سكرامجت. وخلافا للهدروجين، تمتاز معظم أنواع الوقود الهدروكربوني بأنها أقل

إن مهمة حرق الوقود في محرك سكرامجت أشبه بإشعال عود ثقاب في عاصفة وإبقائه مشتعلا بطريقة ما.

الأصلي أو تتخطاها. بيد أنه حتى بعد الاختبارات الأرضية الموسعة للمحرك، ظلت بعض الارتيابات الأساسية المتعلقة بالتطوير قائمة. ويُعد تقصي هذه التساؤلات المتبقية، المرتبطة بمجملها بالمحافظة على الأداء أثناء الظروف الانتقالية - كتغير السرعة والارتفاع وإعدادات الخانق - صعبا جدا في الأنفاق الهوائية، ويستحسن أن يجري التصدي لها في عمليات الطيران الاختبارية.

لهذا السبب، سوف تقوم مركبة البيان العملي لمحرك سكرامجت التابعة لسلاح الجو Scramjet Engine Demonstrator (SED) الأمريكي، والمعروفة حاليا باسم X-51A، بنقل بعض أنظمة محرك «هايتك» إلى الفضاء عام 2009 [*انظر الشكل في الصفحة المقابلة*] وهذا البرنامج هو متابعة لعملية التقييم أثناء الطيران للتقانة، التي مازال العمل جاريا لتحسينها في البرنامج هايتك. وقد استطاع مهندسو «هايتك»، بوساطة اختبارات جرت على الأرض وتحليل حاسوبي موسع، أن يبتكروا محركا من نوع سكرامجت، يتميز بوزن مناسب للطيران وتبريد فاعل، يمكن اختباره ضمن البرنامج SED.

عندما وجد فريق المهندسين البرنامج SED نفسه عاجزا عن تغيير الشكل الداخلي للمحرك أثناء الطيران، بغية تعديل الأداء ليتلاءم مع السرعات والارتفاعات السريعة التغير، وقع اختياره على بناء مسار دفق ذي شكل هندسي ثابت يمكن اعتباره حلا وسطا بين التسارع المناسب في الحد الأدنى لنطاق السرعة (بين 4.5 و 7 ماخ) وبين الأداء الفعال للطيران بأعلى سرعة له التي مقدارها 7 ماخ. وقد تبين أن معالجة توزيع الوقود داخل المحرك هي الوسيلة الأساسية للتحكم في المحرك - أي في قوة دفعه ومعدل تسارعه والحفاظ على عمله المستقر.

لقد صُنع هذا المحرك أساسا من مادة الفولاذ، التي يمكن تبريدها بفعالية بوساطة الدفق الداخلي للوقود. إضافة إلى ذلك، فقد استُعيض عن الفولاذ بمكونات خزفية مقاومة للحرارة في بعض الحافات الأمامية للمحرك - أي المناطق الواقعة في مقدمته، التي تتلقى قوة الصدم المباشر لدفق الهواء الساخن - التي تكون حادة جدا لدرجة لا تسمح لها باحتواء ممرات مادة التبريد. هذا وإن وصل الأجزاء المبردة بالأجزاء غير المبردة بطريقة موثوقة عملية تنطوي على صعوبة كبيرة، لكنها شديدة الأهمية. ومن الواضح أن أي عُطل بنيوي سريع وشديد (قبل أن يبلغ الصاروخ هدفه)، يمكن

تفاعلا وتحتوي على كمية أقل من الطاقة في وحدة الوزن، وبأن سعتها الحرارية المتدنية مناسبة لتبريد الهياكل الساخنة. غير أن الوقود الهدروكربوني شائع الاستخدام في جميع تطبيقات سلاح الجو الأمريكي، ولذلك يحظى بوجود بنية تحتية شاملة لأغراض التوزيع والمناولة. إضافة إلى ذلك، فالوقود الهدروكربوني يعبأ بطريقة أفضل، ويُبدي محتوى أكبر من الطاقة في وحدة الحجم، لذا فإن الحجم الذي يشغله على متن المركبة أقل من الحجم الذي تتطلبه كمية الهدروجين التي تملك المحتوى ذاته من الطاقة.

وللتعويض عن التفاعلية المتدنية لوقود الهدروكربون ومساوئ سعته الحرارية، يستفيد البرنامج هايتك من إمكانات الوقود JP-7 في امتصاص الحرارة - أي من مقدرته على تشرّب الحرارة كيميائيا. فعندما تتلقى هذه الأنواع من الوقود الحرارة من محيطها في غياب الأكسجين ووجود حفاز كيميائي مناسب، تتفكك السلاسل البوليميرية المعقدة فيها وتتحول إلى سلاسل بسيطة وقصيرة. وخلال هذه العملية، يمتص الوقود مقدارا من الحرارة يعادل خمسة أضعاف سعته الحرارية الكامنة - أي الحرارة التي يمتصها السائل بمجرد تسخينه. وإضافة إلى ذلك، يتحول الوقود، بعد تعرضه لتسخين ماص للحرارة، إلى غاز ساخن يحتوي على كمية من الطاقة تزيد بنسبة 10 في المئة على الطاقة الكيميائية للوقود السائل الذي لم يتعرض للتسخين. وفي النهاية، تكون الهدروكربونات الناتجة ذات الوزن الجزيئي المنخفض أكثر تفاعلا من جزيئات الوقود الأصلي. وهذا يسهل عملية احتراقها خلال الوقت القصير الذي يكون فيه الوقود موجودا داخل محرك سكرامجت.

وكان المهندسون قد أنتجوا قبل ذلك محركا ذا شكل هندسي ثابت وحجم كاف لتسيير مركبة شبيهة بالصاروخ (يمكن أن تبدأ فيها عملية احتراق وقود هدروكربوني، مثل الوقود JP-7) بسرعة قدرها 4.5 ماخ ثم تتسارع بعد ذلك لتصل إلى سرعة قدرها 7 ماخ. وهناك تقانات أخرى قيد الإعداد، متعلقة بالتبريد الفاعل والهياكل المقاومة للحرارة تسمح للمحرك بالحفاظ على توازنه الحراري مادام الوقود موجودا في المركبة. وفي عام 2009 سوف يجري تعزيز مركبة الطيران الحر X-51A بصاروخ يمكّنها من بلوغ سرعات هائلة قبل أن تنطلق إلى

(1) tongue-and-groove joints

التتمة في الصفحة 69

حوسبة بالعُقَد الكمومية(*)

آلة تعتمد على جسيمات غريبة، تسمى **الأنيونات** *anyons*، وتمثِّل الحساب كمجموعة من الضفائر في الزمكان، يمكن أن تكون طريقا مختصرا إلى الحوسبة الكمومية العملية.

<P. G.> كولِنز

تَعِد الحواسيب الكمومية بتنفيذ حسابات يُعتقد أنها مستحيلة بواسطة الحواسيب العادية. وبعض هذه الحسابات على قدر كبير من الأهمية في عالم الواقع. فعلى سبيل المثال، بعض طرائق التعمية (التشفير) الواسعة الاستخدام يمكن أن تُكسر بوجود حاسوب قادر على تحليل عدد كبير إلى عوامله الأولية خلال مدة معقولة. وفي الحقيقة، إن جميع الطرائق المستخدمة لتعمية البيانات الشديدة الحساسية عُرضة للكسر بخوارزمية كمومية أو بأخرى.

تُردُّ الطاقة الإضافية التي يتمتع بها الحاسوب الكمومي إلى أنه يعالج معلومات ممثَّلة **ككيوبتات** qubits، أو البتات الكمومية، بدلا من البتات. إن البتَّة التقليدية العادية يمكن أن تكون إما 0 أو 1، وبنى الشِّبات الميكروية الشائعة تعزز هذا الانقسام بين هاتين القيمتين تعزيزا صارما. لكنْ على النقيض من ذلك، يمكن للكيوبتَّة أن تكون فيما يسمى حالة **تراكب** superposition، وهذه تقتضي وجود **نسب** proportions من الـ0 والـ1 متعايشة معا. يمكن للمرء النظر إلى حالات الكيوبتَّة الممكنة على أنها نقاط على كرة، حيث يمثل القطب الشمالي الـ1 التقليدي، ويمثل القطب الجنوبي الـ0 التقليدي، وتمثل جميع النقاط بينهما جميع التراكبات الممكنة للـ0 و الـ1 [انظر: «*قواعد لعالم كمومي معقد*»، **العلوم**، العددان 7/6 (2003)، ص 70]. إن حرية الكيوبتات في التجوال في كامل الكرة تساعد على إعطاء الحواسيب الكمومية مقدراتها الفريدة.

لكن لسوء الطالع يبدو أن بناء الحواسيب الكمومية شديد الصعوبة. ويُعبَّر عادة عن الكيوبتات باعتبارها خواص كمومية معينة **لجسيمات مأسورة** trapped particles، من قبيل الأيونات (الشوارد) الذرية والإلكترونات المستقلة. لكن حالات تراكب تلك الجسيمات هي هشة جدا، إذ يمكن لأضأل التآثرات المشوِّشة مع البيئة المحيطة، التي تشمل جميع المادة التي يتكوَّن منها الحاسوب نفسه، أن تعطبها. فإذا لم تُعزل الكيوبتات عن محيطها بعناية، فإن مثل هذه الاضطرابات سوف تُدخل أخطاء في الحوسبة.

لذا، تُركِّز معظم طرائق تصميم الحاسوب الكمومي على إيجاد سبل لجعل تآثرات الكيوبتات مع المحيط أصغرية. ويعرف الباحثون أنه إذا كان من الممكن تخفيض معدل الخطأ إلى حد

(*) COMPUTING WITH QUANTUM KNOTS



بضفر خطوط العالم (مسارات) world lines لجسيمات خاصة، يمكن تنفيذ حوسبة كمومية مستحيلة الإجراء بأي حاسوب عادي (تقليدي). إن تلك الجسيمات تعيش في سائل يسمى غاز إلكترونات ثنائي الأبعاد.

لأول وهلة، لا يبدو الحاسوب الكمومي الطبولوجي كثيرا كحاسوب.

واحد في كلّ 10 000 خطوة. فإن إجراءات تصحيح الخطأ يمكن أن تُستخدم للتعويض عن عطب الكيوبتات الإفرادية. إن بناء آلة عاملة، تحوي عددا كبيرا من الكيوبتات المعزولة عزلا جيدا للحصول على معدل الخطأ المنخفض هذا، مهمةٌ مُروِّعة جعلت الفيزيائيين أبعد ما يكونون عن إنجازها.

لكن بعض الباحثين يستقصون نهجا مختلفا كليا لبناء حاسوب كمومي. في نهجهم ذاك، تعتمد الحالات الكمومية المرهفة على ما يُعرف بالخواص الطبولوجية للنظم الفيزيائية. إن الطبولوجيا هي الدراسة الرياضياتية للخواص التي لا تتغير حينما يتشوّه الجسم تشوُّها ناعما، بأفعال كالمطِّ والرَّقِّ والحني، لا القطع والوصل، وهي تشمل مواضيع من مثل **نظرية العُقد** knot theory. والاضطرابات الضئيلة لا تغيِّر الخواص الطبولوجية. فالحلقة المغلقة، على سبيل المثال، المكوَّنة من خيط يحوي عقدة مربوطة فيه، تختلف طبولوجيا عن حلقة مغلقة ليس فيها عقدة [*انظر الإطار في الصفحة 64*]. إن الطريقة الوحيدة لتحويل الحلقة المغلقة إلى حلقة مغلقة مع عقدة هي قطع الخيط، وعَقْد العقدة ثم إعادة لصق طرفي الخيط معا. وبالمثل، فإن الطريقة الوحيدة لتحويل كيوبتة طبولوجية إلى حالة مختلفة، هي تعريضها لإجراء عنيف كمثل ذلك الإجراء. فالوكزات الضئيلة التي تسببها البيئة المحيطة لا تُفلح في ذلك.

لأول وهلة، لا يبدو الحاسوب الكمومي الطبولوجي كالحاسوب على الإطلاق. فهو يُجري حساباته على خيوط مضفورة، لكن هذه الخيوط ليست خيوطا مادية بالمعنى التقليدي، بل هي ما يصفها الفيزيائيون بأنها **خطوط العالم** world lines، وهي تمثيل للجسيمات حينما تتحرك عبر المكان والزمان (تخيَّل أن طول واحد من هذه الخيوط يمثل حركة الجسيم عبر الزمن، وأن ثخانته تمثل أبعاد الجسيم المادية). حتى إن الجسيمات المستخدمة ليست كالإلكترونات والبروتونات التي قد تخطر ببال المرء أول الأمر، بل هي **أشباه جسيمات** quasiparticles، أي تهييجات في منظومة إلكترونية ثنائية الأبعاد تسلك سلوكا مشابها كثيرا لسلوك الجسيمات والجسيمات المضادة في فيزياء الطاقات العالية. ولمزيد من التعقيد، فإن أشباه الجسيمات تلك هي من نوع خاص يسمى **الأنيونات** anyons، التي تمتلك الخواص الرياضياتية المطلوبة.

وهاك ما يمكن لحوسبة ما أن تكون: ولِّدْ، أولا، زوجا من الأنيونات وضَعْهما على خط جنبا إلى جنب [*انظر الإطار في الصفحة 65*]. إن كل زوج من الأنيونات يبدو كجسيم وجسيم مضاد له، تولّدا من طاقة بحتة.

بعد ذلك حرِّك أزواج الأنيونات المتجاورة، بعضا حول بعض، في سلسلة من الخطوات المحددة بعناية. يُشكِّل خط عالم كل أنيون خيطا، وتؤدي حركات الأنيونات، لدى مبادلة مواضعها بهذه الطريقة، إلى ضفر جميع الخيوط. إن الحوسبة الكمومية متضمَّنة في الضفيرة الخاصة المشكَّلة بهذا النحو وتتحدد الحالات النهائية للأنيونات، والتي تجسِّد نتيجة الحوسبة، بالضفيرة لا بأي تأثر إلكتروني أو مغنطيسي مشوِّش. ونظرا إلى أن الضفيرة طبولوجية - أي إن وكز الخيوط قليلا هنا وهناك لا يغيِّر الضفيرة - فإنها تكون محمية بطبيعتها من الاضطرابات الخارجية. لقد اقترح فكرة استخدام الأنيونات لإجراء الحوسبة بهذه الطريقة في عام 1997 <A. Y.> كيتاييڤ> [وهو يعمل حاليا في الشركة مايكروسوفت].

ألقى <M. H.> فريدمان> [وهو يعمل حاليا لدى الشركة مايكروسوفت] محاضرات في جامعة هارڤرد في خريف عام 1988 حول إمكان استخدام الطبولوجيا الكمومية في الحوسبة. إن هذه الأفكار، التي نُشرت في مقالة بحثية في عام 1998، بُنيت على اكتشاف أن مقادير رياضياتية معينة، تُعرف بـ«**لامتغيرات العُقد**» knot invarients، كانت على علاقة بالفيزياء الكمومية لسطح ثنائي الأبعاد يتطور في الزمن. فإذا أمكن بناء نموذج لمثل هذه المنظومة الفيزيائية وإجراء القياس الملائم، فإن لامتغيرات العقد يمكن أن تُحسب تلقائيا تقريبا عوضا عن إجراء الحسابات الطويلة بحاسوب تقليدي. ويمكن أن تكون لمسائل لها صعوبة مماثلة، لكنها ذات أهمية أكثر واقعية، سُبلُ حساب مختصرة مماثلة.

ومع أن هذا يبدو تنظيرا غريبا وبعيدا عن الواقع، فقد وُضعت تجاربُ حديثة، في حقل يُعرف بفيزياء «**هول الكمومية الكسرية**»[(1)] fractional quantum Hall physics، طريقة الأنيونات على أرض صلبة. واقتُرح مزيد من التجارب لتحقيق خطوات أولية في الحوسبة الكمومية الطبولوجية

الأنيونات(**)

وفقا لما ذُكر آنفا، يضفر الحاسوب الكمومي الطبولوجي خطوط العالم بمبادلة مواضع الجسيمات. إن كيفية تصرف

نظرة إجمالية/ الضفائر الكمومية(*)

- **تُعد الحواسيب الكمومية بأن تتجاوز قدراتُها كثيرا قدرات الحواسيب التقليدية، لكنْ كي تصبح عاملة من حيث المبدأ، يجب أن تكون معدلات الأخطاء فيها منخفضة جدا. وتحقيق معدلات الخطأ المنخفضة المطلوبة بوساطة التصاميم التقليدية بعيد عن متناول الإمكانات التقانية الحالية.**
- **أما التصميم البديل فهو ما يُسمى الحاسوب الكمومي الطبولوجي الذي يستخدم نظاما فيزيائيا مختلفا جذريا لإجراء الحوسبة الكمومية. إن الخواص الطبولوجية لا تتغير بالاضطرابات الطفيفة، وهذا ما يؤدي إلى مناعة ذاتية من أخطاء كتلك التي تسببها التأثرات المشوِّشة مع البيئة المحيطة.**
- **يمكن للحوسبة الكمومية الطبولوجية أن تستخدم تهيُّجات مفترضة نظريا، تسمَّى أنيونات، وهي بنى شبه جسيمية particlelike غريبة ممكنة الوجود في عالم ثنائي الأبعاد. وقد أشارت التجارب حديثا إلى أن الأنيونات توجد في بنى شبه موصلة مستوية خاصة، تُبرَّد إلى درجة حرارة قريبة من الصفر المطلق وتُغمر في حقول مغنطيسية شديدة.**

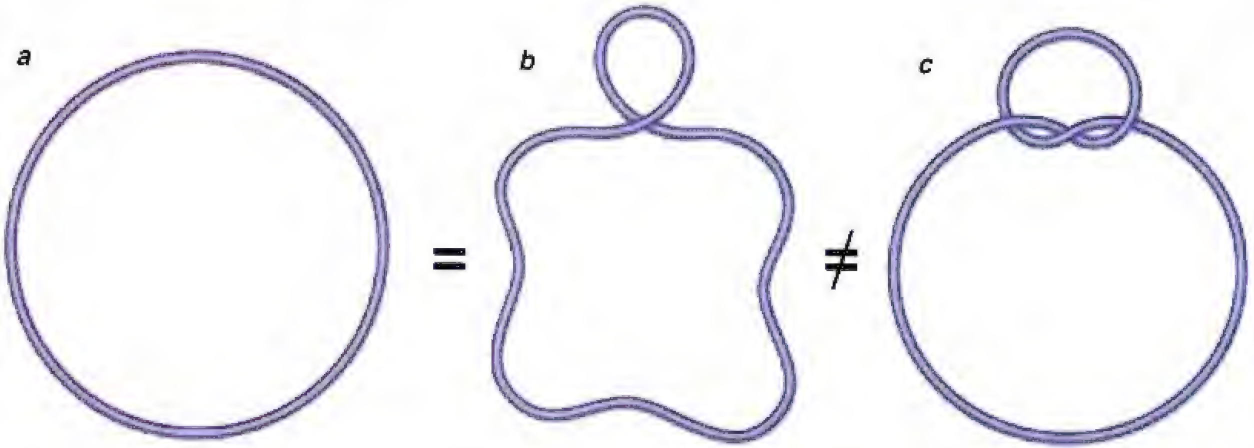
(*) Overview/ Quantum Braids

(**) Anyons

(1) تأتي صفة الكسرية من حقيقة أن شحنة الجسيمات الكمومية تساوي كسرا من شحنة الإلكترون. (التحرير)

الطبولوجيا والعقد(*)

لا تتغير طبولوجيا **الحلقة المغلقة** closed loop (a) إذا دُفع الخيط ليُكوِّن شكلا آخر (b) مختلفا عن ذاك ذي الحلقة المغلقة الذي يحتوي عقدة مربوطة فيه (c). إذ لا يمكن تشكيل العقدة بمجرد تحريك الخيط لفعل ذلك. لا بد من قطع الخيط وربط العقدة، ثم إعادة وصل الطرفين. لذا، تكون طبولوجيا الحلقة **غير حساسة** insensitive للاضطرابات التي تحرك الخيط من مكان إلى آخر



الجسيمات حين مبادلة مواضعها هي واحدة من أوجه الاختلاف الجوهرية الكثيرة بين الفيزياء الكمومية والفيزياء التقليدية. ففي الفيزياء التقليدية، إذا كان لديك إلكترونان في الموضعين a و b، وقمت بمبادلة موضعيهما، فإن الحالة النهائية تماثل الحالة الابتدائية؛ إذ لما كان من غير الممكن التمييز بين الإلكترونين، فإنه لا يمكن التمييز أيضا بين الحالتين الابتدائية والنهائية. أما في الفيزياء الكمومية، فالأمر ليس بهذه البساطة.

ينجم الاختلاف عن أن الميكانيك الكمومي يصف حالة الجسيم بمقدار يسمى **دالة (تابع) الموجة** wave function، أيْ موجة في فضاء، يتضمن جميع خواص الجسيم، مثل احتمال العثور عليه في المواضع المختلفة، واحتمال قياسه عند سرعات مختلفة، وهلمَّ جرًّا. وعلى سبيل المثال، يكون العثور على الجسيم في منطقة معينة أعلى احتمالا إذا كان لدالة الموجة في هذه المنطقة **مطال** amplitude أكبر.

يتعين زوج من الإلكترونات بدالة موجة مشتركة، وحين مبادلة موضعي الإلكترونين، تكون دالة الموجة المشتركة الناتجة هي دالة الموجة المشتركة الأصلية مضروبة بـ(-1). وهذا يجعل **قمم** peaks الموجة **قيعانا** troughs، وقيعانها قمما، لكنه لا يؤثر في مطال الاهتزاز، ولا يغير أيَّ مقدار قابل للقياس يخص الإلكترونين المعنيين بالذات.

لكن ما يتغيَّر فعلا هو الكيفية التي يمكن للإلكترونين التداخل بها مع الإلكترونات الأخرى. يحصل **التداخل** interference عندما تُجمع موجتان معا. وعندما تتداخل موجتان، يكون لمجموعهما مطال كبير حيثما تقع قمم إحداهما على خط مستقيم مع قمم الأخرى («**تداخل بنَّاء**» constructive interference)، ومطال صغير حيثما تقع قمم الأولى على خط مستقيم مع قيعان الأخرى («**تداخل هدَّام**» destructive interference). وضَرْبُ إحدى الموجات بـ(-1) يجعل القمم قيعانا، ولذا يبدِّل التداخلَ البنَّاء، بقعة مضيئة، بتداخل هدَّام، بقعة مظلمة.

ليست الإلكترونات وحدها هي التي تتأثر بالعامل (-1) بهذه الطريقة، بل البروتونات والنيوترونات أيضا. وعموما أيّ جسيم من الفئة التي تُدعى **فرميونات** ferminos. أما البوزونات، وهي فئة الجسيمات الرئيسية الأخرى، فتمتلك دوال موجة لا تتغير حينما يتبادل جسيمان موضعيهما. لذا يمكنك القول إن دوال موجاتها تُضرب بعامل يساوي (+1).

تقتضي أسبابٌ رياضياتية عميقة أن الجسيمات الكمومية في الأبعاد الثلاثة يجب أن تكون إما فرميونات أو بوزونات. أما في بعدين اثنين، فثمة إمكانية أخرى: يمكن للعامل أن يكون **طورا عُقَديا** complex phase. ويمكن تخيل الطور العقدي على شكل زاوية. فالزاوية التي تساوي 0 تقابل 1، والزاوية التي تساوي 180 درجة تقابل -1. أما الزوايا بين هاتين القيمتين فهي أعداد عقدية. على سبيل المثال، الزاوية 90 درجة تقابل i، أي الجذر التربيعي لـ(-1). وكما في حالة العامل (-1)، فإن ضرب دالة الموجة بطور لا يؤثِّر أبدا في الخصائص المقاسة للجسيم ذاته، لأن المهم في هذه الخصائص هو مطال اهتزاز الموجة فقط. ومع ذلك، فإن الطور (أي العدد العقدي) يمكن أن يغيِّر كيفية تداخل موجتين عقديتين.

تسمى الجسيمات، التي تأخذ طورا عقديا حين مبادلة مواضعها، أنيونات لأنه يمكن لهذا الطور أن يأخذ أيَّ قيمة عقدية، لا إحدى القيمتين +1 أو -1 فقط. أما الجسيمات التي تنتمي إلى **جنس** species معين، فتأخذ دائما الطور نفسه.

إلكترونات في أرض مسطحة(**)

توجد الأنيونات في عالم ثنائي الأبعاد فقط. فكيف نستطيع توليد أزواج منها لاستخدامها في الحوسبة الطبولوجية ونحن نعيش في ثلاثة أبعاد؟ إن الجواب عن هذا السؤال يكمن في مملكة الأرض المسطحة لأشباه الجسيمات. يمكن صنع شريحتين من شبه موصل مصنوع من زرنيخ الغاليوم بعناية كي تحتضن هاتان الشريحتان «غازا

(*) Topology And Knots

(**) Electrons in Flatland، و Flatland هنا إشارة إلى الرواية Flatland: A romance of many dimensions، للكاتب Edwin A. Abbott (1838 - 1926)، وفيها يتخيل عوالم أحادية وثنائية وثلاثية ... وسداسية الأبعاد. (التحرير)

طريقة عمل الحوسبة الكمومية الطبولوجية(*)

الضَفْر

فقط بحركتين أساسيتين في المستوي، هما مبادلة المواضع باتجاه حركة عقارب الساعة، ومبادلتها في الاتجاه المعاكس، يمكن توليد جميع طرائق الضفر الممكنة لخطوط العالَم (للمسارات عبر الزمكان) لمجموعة من الأنيونات

الضفيرة الناتجة



مبادلة مواضع بعكس اتجاه دوران عقارب الساعة



الضفيرة الناتجة

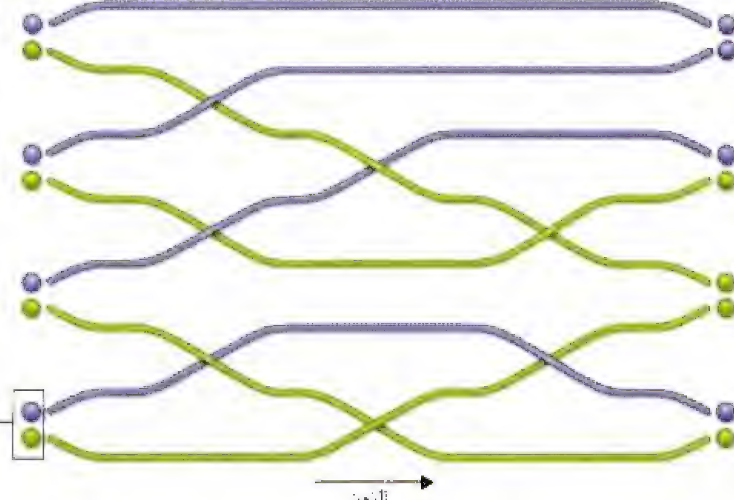


مبادلة مواضع باتجاه دوران عقارب الساعة

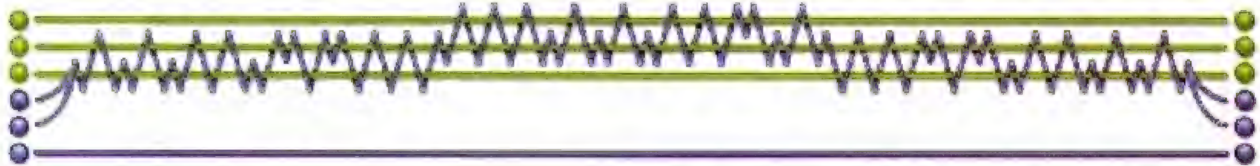


حوسبة

تُولَّد أولا أزواج من الأنيونات، وتُصفُّ في سطر لتُمثِّل كيوبتات الحوسبة، أو بتات الحوسبة الكمومية. وتُحرَّك الأنيونات من أمكنتها، بمبادلة مواضع الأنيونات المتجاورة وفقا لسلسلة خطوات معينة. إن هذه الحركات تُقابل عمليات تُجرى على الكيوبتات. وفي النهاية، تُضم أزواج الأنيونات المتجاورة معا، وتُقاس لتكوين مُخْرج output الحوسبة. ويعتمد المُخْرَج على طبولوجيا الضفر المحدد الناجم عن تلك العمليات. إن الاضطرابات الطفيفة في الأنيونات لا تغير الطبولوجيا، وهذا ما يجعل الحوسبة منيعة على أخطاء المصادر العادية.



بناء بوابة منطقية



تُصنع بوابة منطقية، تسمّى بوابة النفي المتحكَّم فيها CNOT، بعملية الضفر المعقدة هذه لستة أنيونات. تأخذ البوابة CNOT كيوبتتين في مدخلها وتُنتج كيوبتتين في مخرجها. وقد مُثِّلت هذه الكيوبتات بثُلاثيَّتين (خضراء وزرقاء) مما يسمى أنيونات فيبوناتشي Fibonacci. إن أسلوب الضفر الخاص هذا، أي ترك ثلاثية واحدة في مكانها وتحريك أنيونين من الثلاثية الثانية حول أنيونات الأولى، بسَّط الحسابات المستخدمة في تصميم البوابة. وأسلوب الضفر هذا يُنتج بوابة CNOT دقتها تساوي تقريبا 10^{-3}

من الإلكترونات في السطح الفاصل بينهما. تتحرك الإلكترونات بحرية في بُعدي السطح الاثنين، لكنها تُمنع من الحركة في البعد الثالث، لأن ذلك يُخرجها من السطح. وقد درس الفيزيائيون باستفاضة نظم الإلكترونات هذه، التي تسمى غازات الإلكترونات الثنائية الأبعاد(1)، وخاصة حينما تُغمر في حقول مغنطيسية عرضانية قوية عند درجات حرارة منخفضة جدا، وذلك بسبب الخواص الكمومية الاستثنائية التي تظهر في هذه الظروف.

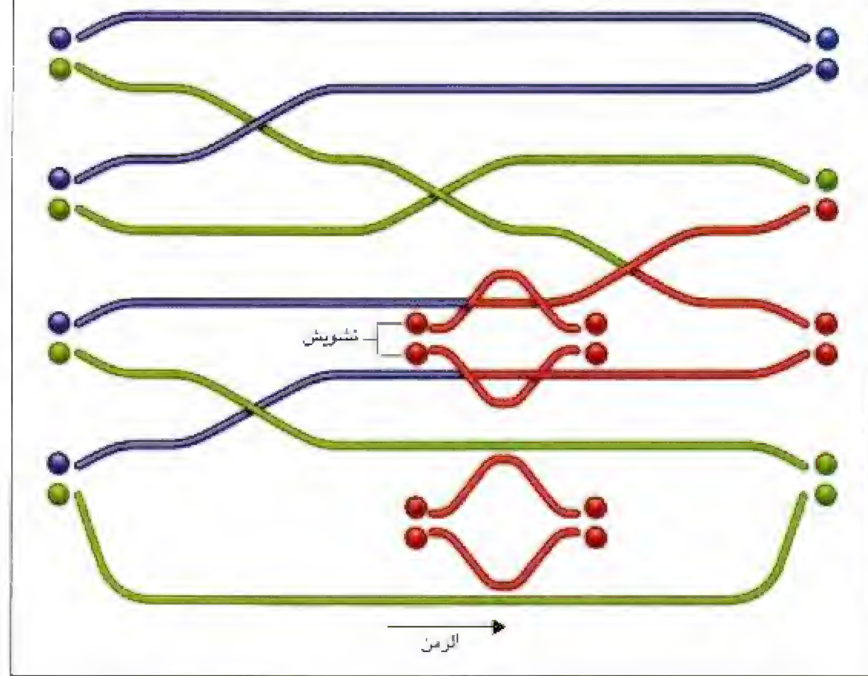
على سبيل المثال، في مفعول «هول» الكمومي الكسري، تسلك التهيُّجات في غاز الإلكترونات سلوك جسيمات ذات شحنة تساوي جزءا من شحنة الإلكترون. وتحمل تهيُّجات أخرى وحدات من **السيالة المغنطيسية** magnetic flux معها كما لو كانت السيالة جزءا لا يتجزأ من الجسيم. وفي عام 2005، ادعى «J. V. كولدمان»، و«F. E. كامينو»، و«W. زهو» [من جامعة ستوني بروك] أنهم حصلوا على تأكيد تجريبي مباشر لما مفاده أن أشباه الجسيمات التي تحدث في حالة «هول» الكمومية الكسرية هي أنيونات. وهذه

(*) How Topological Quantum Computing Works

(1) two-dimensional electron gaz

منع الأخطاء العشوائية(*)

سوف تحصل أخطاء في الحوسبة الطبولوجية إذا ولّدت التفاوتات الحرارية أنيونين مشوّشين يُجدلان مع ضفيرة الحوسبة قبل أن يتفانيا ذاتيا. وهذه المشوّشات سوف تُخرِّب (الخطوط الحمراء) الحوسبة. لكن احتمال هذا التداخل يتناقص أسّيا مع المسافة التي تقطعها الأنيونات. لذا يمكن جعل معدل الخطأ أصغريا بإبقاء أنيونات الحوسبة بعيدة بعضها عن بعض بعدا كافيا (الزوج السفلي).



خطوة مهمة أولى في النهج الطبولوجي للحوسبة الكمومية. لكن بعض الباحثين مازالوا يستقصون سبلا مستقلة أخرى لإثبات طبيعة أشباه الجسيمات الأنيونية، لأن مفاعيل لاكمومية معينة يمكن أن تؤدي، من حيث الفكرة، إلى النتائج التي حصل عليها «گولدمان» وزملاؤه.

في البعدين الاثنين، ثمة أمر جديد مهم يبرز حين مبادلة موضعي الجسيمين: هل يتّبع الجسيمان مسارين باتجاه دوران عقارب الساعة، أو بعكس ذلك الاتجاه، حين مبادلة موضعيهما؟ إن الطور الذي تأخذه دالة الموجة يعتمد على تلك الخاصية. فالمساران البديلان متمايزان طبولوجيا، لأن القائم بالتجربة لا يستطيع باستمرار تغيير المسارين اللذين لهما اتجاه دوران عقارب الساعة ليصبحا بعكس ذلك الاتجاه من دون جعل المسارين يتقاطعان والجسيمين يتصادمان في مكان ما.

يتطلّب بناء حاسوب كمومي طبولوجي تعقيدا إضافيا آخر: يجب أن تتصف الأنيونات بصفة تُدعى **اللاتبديلية** nonabelian التي تُعني أن ترتيب تسلسل مبادلة مواضع الجسيمات هو أمر مهم. تخيل أن لديك ثلاثة أنيونات متماثلة مصطفة على سطر في المواضع a و b و c. بادلْ أولا موضعي الأنيونين في الموضعين a و b، ثم بادلْ موضعي الأنيونين الموجودين الآن في b و c. إن النتيجة ستكون الدالة الأصلية للموجة معدلة بعامل ما. افترض أنه جرت مبادلة موضعي الأنيونين اللذين في b و c أولا، ثم جرت مبادلة الموضعين a و b. فإذا كانت النتيجة هي دالة الموجة مضروبة بنفس العامل الذي كان من قبل المبادلة، وُصفت الأنيونات بأنها تبديلية. أما إذا اختلف العاملان بسبب اختلاف ترتيب المبادلة، كانت الأنيونات لاتبديلية (تنشأ خاصية اللاتبديلية لأن العامل الذي تُضرب به دالة موجة هذه الأنيونات يتكوّن من مصفوفة أعداد، ونتيجة ضرب مصفوفتين تعتمد على ترتيبهما.)

لقد تضمنت التجربة التي أجراها فريق «گولدمان» أنيونات تبديلية. ومع ذلك، يوجد لدى النظريين مبررات قوية للاعتقاد بأن أشباه جسيمات معينة، من أشباه جسيمات هول الكمومية الكسرية، هي لاتبديلية حقا. وقد اقتُرحت تجربتان للإجابة عن هذا السؤال. اقترح إحداهما «فريدمان» مع «S. D. سارما» [من جامعة ماريلاند] و «C. ناياك» [من الشركة مايكروسوفت]، مع تنقيحات مهمة اقترحها «A. شترن» [من معهد وايزمان] و«B. هالبرين» [من جامعة هارفرد]. واقترح الثانية «كيتايف» و «P. بوندرسون» [من معهد كاليفورنيا للتقانة] و «K. شتنگل» [من جامعة كاليفورنيا بريفرسايد].

ضفائر وبوابات(**)

إذا حصلْتَ على أنيونات لاتبديلية، فإنك تستطيع توليد تمثيل مادي لما يسمّى **زمرة الضفيرة** the braid group. إن هذه البنية الرياضياتية تصف جميع الطرائق التي يمكن بها ضفر صف معين من الخيوط معا. ويمكن تشكيل أيّ ضفيرة من سلسلة من العمليات الأولية التي يُحرَّك فيها خيطان متجاوران باتجاه دوران عقارب الساعة أو بعكسه. إن كل سلسلة ممكنة لمعالجة الأنيونات تقابل ضفيرة، والعكس صحيح. وتقابل كلُّ ضفيرة أيضا مصفوفة شديدة التعقيد هي نتيجة ضم جميع المصفوفات الإفرادية لكل مبادلة أنيونية.

والآن، صار بين أيدينا جميع العناصر اللازمة لرؤية كيف أن هذه الضفائر تقابل حوسبة كمومية. في الحاسوب التقليدي، تُمثَّل حالة الحاسوب بحالة جميع بتاته مجتمعة، أي بسلسلة الأصفار والآحاد في سجله. وبالمشابهة، يُمثَّل الحاسوب الكمومي بحالة كل كيوبتاته مجتمعة. وفي الحاسوب الكمومي الطبولوجي، يمكن تمثيل الكيوبتات بمجموعات من الأنيونات.

في الحاسوب الكمومي، توصف سيرورة الانتقال من الحالة الابتدائية لجميع الكيوبتات إلى الحالة النهائية بمصفوفة تُضرب بدالة الموجة المشتركة للكيوبتات جميعا. إن وجه التشابه، بين ذلك وبين ما يحصل في حاسوب كمومي طبولوجي، واضح: المصفوفة هنا هي تلك المقترنة بالضفيرة المحددة المقابلة لسلسلة معالجة الأنيونات. بهذا نكون قد بيّنا أن العمليات المُجراة على الأنيونات تُنتج حوسبة كمومية.

وثمة سمة مهمة أخرى يجب إثباتها: هل يستطيع حاسوبنا الكمومي الطبولوجي إجراء أي حوسبة يستطيع إجراءها حاسوب كمومي تقليدي؟ في عام 2002، أثبت «فريدمان» وزملاؤه أن الحاسوب الكمومي الطبولوجي

(*) Preventing Random Errors
(**) Braids and Gates

يستطيع فعلا محاكاة أي حوسبة يجريها حاسوب كمومي عادي، مع نقيصة واحدة وهي أن المحاكاة تقريبية. لكنْ إذا حُددت درجة الدقة المرغوبة، كأنْ تكون 1 من 10^{10} مثلا، فإنه يمكن إيجاد ضفيرة تحاكي الحوسبة المطلوبة بتلك الدقة. وكلما ازدادت الدقة المطلوبة، ازداد عدد الجدلات في الضفيرة. ومن حسن الطالع أن عدد الجدلات اللازمة يتزايد ببطء شديد؛ لذا فليس من العسير جدا الحصول على دقة عالية جدا. لكن برهانهم لا يشير إلى كيفية تحديد الضفيرة الفعلية التي تقابل حوسبة ما، لأن ذلك يعتمد على التصميم الخاص بالحاسوب الكمومي الطبولوجي، وخصوصا، على جنس الأنيونات المستخدمة وعلاقتها بالكيوبتات الأساسية.

في عام 2005، قام <E. N. بونستيل> وزملاؤه [من جامعة ولاية فلوريدا] بمعالجة مسألة إيجاد ضفائر خاصة بإجراء حوسبات معينة. وقد بيَّن الفريق، على نحو جلي، كيفية بناء ما يُسمَّى بوابة النفي NOT(1) المتحكَّم فيها (أو بوابة CNOT)، بدقة جزأين من 10^3 جزء، وذلك بضفر ستة أنيونات. تأخذ البوابة CNOT مُدخَلَيْن: بتَّةُ تحكُّم وبتة متحكَّم فيها. إذا كانت بتَّة التحكم 1، فإنها تغير البتَّة الأخرى من 0 إلى 1، أو العكس، وإلا، لا تتغير البتات. وبالعمل بالكيوبتات، يمكن تركيب أي حوسبة من شبكة من بوابات الـ CNOT، إضافة إلى عملية واحدة أخرى هي ضرب الكيوبتات الإفرادية بطور عقدي. وهذه النتيجة تمثل تأكيدا آخر لحقيقة أن الحواسيب الكمومية الطبولوجية تستطيع تنفيذ أي حوسبة كمومية.

تستطيع الحواسيب الكمومية تنفيذ مهام يُعتقد أن تنفيذها مستحيل بواسطة الحواسيب التقليدية. فهل من الممكن أن يكون الحاسوب الطبولوجي أكثر مقدرة من الحاسوب الكمومي التقليدي؟ تُبين مُبرهَنة أخرى، أثبتها <فريدمان> و<كيتاييف> و<وانگ> أن الأمر ليس كذلك. فقد أوضحوا أنه يمكن محاكاة عمل الحاسوب الكمومي الطبولوجي، بكفاءة عالية وبأيٍّ دقة، بواسطة حاسوب كمومي عادي. وهذا يعني أن الحاسوب الكمومي العادي يستطيع حوسبة كل شيء يستطيع الحاسوب الكمومي الطبولوجي حوسبته. إن هذه النتيجة توحي بنظرية عامة مفادها أن جميع النظم الحاسوبية، التي هي على درجة كافية من التطور والتي تستخدم موارد كمومية، تمتلك

أخطاء طبولوجية(*)

كاشف أنيوني

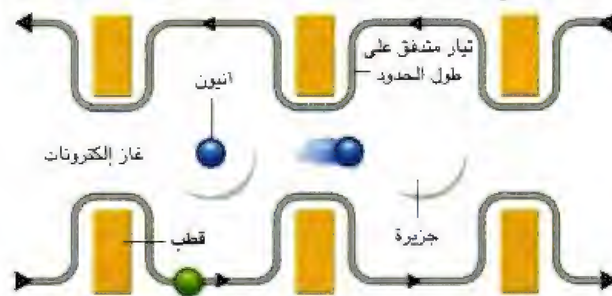
استخدم <J. V. گولدمان> وزملاؤه التجهيزة المبينة في هذا الشكل لبيان أن أشباه جسيمات معينة (تهيجات في حالة «هول» الكمومية) تسلك سلوك الأنيونات. لقد بُرِّدت التجهيزة إلى الدرجة 10 ميلي كلفن ووُضعت في حقل مغنطيسي شديد. وقد تشكَّل غاز إلكترونات ثنائي الأبعاد حول الأقطاب الأربعة، مع نوعين مختلفين من أشباه الجسيمات وُجدت في المنطقتين الصفراء والخضراء. وأكدت خصائص التيار المتدفق على طول الحدود أن أشباه الجسيمات التي هي في الجزيرة الصفراء كانت أنيونية.



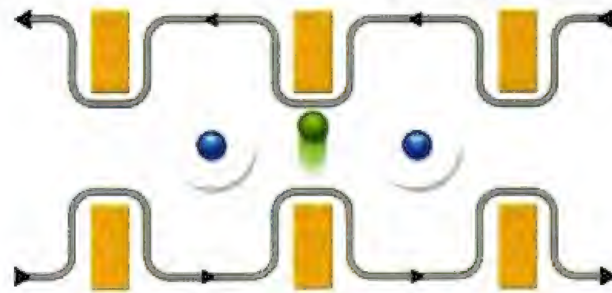
بوابة النفي

إن بوابة النفي الأنيونية المقترحة هذه تقوم على حالة «هول» الكمومية الكسرية التي تتضمن أنيونات تمتلك ربع شحنة إلكترون. وتُحرِض الأقطاب جزيرتين يمكن أن تُؤسر فيهما الأنيونات. ويتدفق التيار على طول الحدود، لكنه، بتوافر الظروف الملائمة، يستطيع التدفق في نفق عبر الفجوات الضيقة بين الأقطاب المتقابلة.

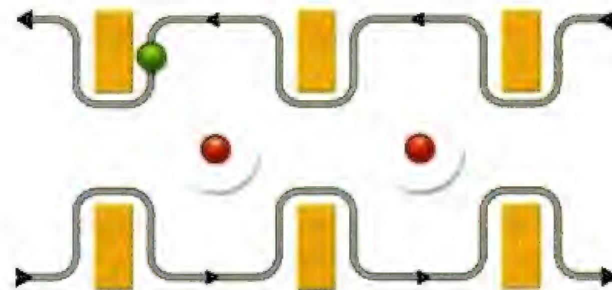
1 حَضِّر الحالة الابتدائية للبوابة بوضع أنيونين (الأزرق) في جزيرة، ثم طبِّقْ جهدا كهربائيا لنقل أنيون واحد إلى الجزيرة الأخرى. يمثل هذا الزوج من الأنيونات الكيوبتة في حالتها الابتدائية التي يمكن تحديدها بقياس التيار المتدفق على طول الحدود المجاورة.



2 لقلب حالة الكيوبتة (عملية النفي)، طبِّقْ جهودا كهربائية لجعل أنيون واحد من الحدود (الأخضر) يعبر التجهيزة بقطع نفق.



3 إن عبور هذا الأنيون يغير علاقة الطور بين الأنيونين، وهذا ما يجعل قيمة الكيوبتة تنقلب إلى الحالة المعاكسة (الأحمر).



(*) Topological Errors

(1) البوابة المنطقية NOT

لقد قدَّر الباحثون الثلاثة أن معدل الخطأ في بوابة النفي التي اقترحوها يمكن أن يساوي 10^{-30} أو أقل.

القدرات الحوسبية نفسها تماما (كان «A. تشرش» و «A. تورينك» قد اقترحا أطروحة مماثلة في ثلاثينات القرن العشرين حول الحوسبة التقليدية)

جسيمات داخلة، وإجابات خارجة[*]

لقد تغاضيتُ حتى الآن عن سيرورتين حاسمتين لبناء حاسوب كمومي طبولوجي عملي، هما إعطاء القيم الابتدائية للكيوبتات قبل بدء الحوسبة وقراءة الجواب في النهاية.

تتضمن الخطوة الابتدائية توليد أزواج من أشباه الجسيمات، والمشكلة حينئذ هي معرفة نوع أشباه الجسيمات التي جرى توليدها. إن الإجراء الأساسي لتحقيق ذلك هو تمرير أنيونات اختبار حول الأزواج المولَّدة، ثم قياس الكيفية التي تغيرت بها أنيونات الاختبار في تلك السيرورة، والتي تعتمد على نوع الأنيونات التي مرت بها (إذا تغير أنيون اختبار، فإنه لن يتفانى تماما مع قرينه) بعدئذ تهمل أزواج الأنيونات التي ليست من النوع المطلوب.

وخطوة قراءة النتيجة تتضمن أيضا قياس حالات أنيونية. وحينما تكون الأنيونات بعيدة بعضها عن بعض، يكون ذلك القياس مستحيلا. ولذا يجب تجميع الأنيونات في أزواج بغية قياسها. وعلى وجه التقريب، يشبه هذا القياس التحقق من أن الأزواج تتفانى تماما. على غرار الجسيمات المضادة الحقيقية، أو أنها تترك وراءها رواسب من الشحنة والسيالة flux، التي تكشف عن الكيفية التي تغيرت بها حالاتها بالضفر، انطلاقا من علاقة الجسيم المضاد نفسها التي استهلاَّ بها حياتهما.

من ناحية أخرى، ليس صحيحا أن الحاسوب الطبولوجي منيع تماما على الخطأ. ومصدر الخطأ الرئيسي فيه هو التفاوتات الحرارية في مادة الركيزة[1] التي يمكن أن تولِّد زوجا إضافيا من الأنيونات، فينجدل كل من الأنيونين مع ضفيرة الحوسبة، وفي النهاية يتفانيان ثانية [*انظر الإطار في الصفحة 66*] لكنْ من حسن الطالع أن سيرورة التوليد الحرارية تُكبت عند درجة الحرارة المنخفضة التي يعمل عندها الحاسوب الطبولوجي. يُضاف إلى ذلك أن احتمال حدوث تلك السيرورة بأسرها ينخفض أسيا مع تزايد المسافة التي على الدخلاء قطعها. لذا يمكن تحقيق أي درجة من الدقة المطلوبة، ببناء حاسوب كبير كبرا كافيا لإبقاء الأنيونات العاملة بعيدة بعضا عن بعض أثناء ضفرها.

لاتزال الحوسبة الكمومية الطبولوجية في مهدها، إذ لم يُستعرض حتى الآن وجود عناصر العمل الأساسية، أي الأنيونات اللاتبديلية. ولم تُبنَ أبسط البوابات المنطقية. لكن تجربة «فريدمان» وزملائه المذكورة آنفا يمكن أن تحقِّق هذين الهدفين ـ إذا ثبت أن أنيونات التجربة لاتبديلية، وفقا لما هو متوقع، فإن التجهيزة يمكن أن تطبِّق عملية النفي المنطقية على الحالة الكيوبتية. ويقدِّر هؤلاء الباحثون أن معدل الخطأ في السيرورة يمكن أن يكون 10^{-30} أو أقل. ينجم معدل الخطأ الضئيل هذا عن أن احتمال الخطأ يتناقص أسيا مع انخفاض درجة الحرارة وزيادة طول المسافة التي على الأنيونات المشوشة قطعها. إن عامل الأسية هذا هو الإسهام الجوهري للطبولوجيا، وليس له نظير في النُّهُج التقليدية للحوسبة الكمومية.

إن الأمل في الحصول على معدلات أخطاء منخفضة انخفاضا استثنائيا، أي أصغر بمراتب كِبَر[2] كثيرة من تلك التي يمكن الحصول عليها بواسطة طرائق الحوسبة الكمومية الأخرى حتى الآن، هو ما يجعل الحوسبة الكمومية الطبولوجية مغرية. أما التقانات اللازمة لصنع تجهيزة «هول» الكمومية الكسرية، فهي ناضجة أيضا، إذ إنها هي نفسها تلك المستخدمة في صناعة الشيپات الميكروية. أما المثلبة[3] الوحيدة فهي أن هذه التجهيزات يجب أن تعمل عند درجات حرارة منخفضة جدا، من رتبة الملّي كلفن، كي تبقى أشباه الجسيمات السحرية مستقرة.

إذا كانت الأنيونات اللاتبديلية موجودة فعلا، فإن الحواسيب الكمومية الطبولوجية سوف تتجاوز تصاميم الحاسوب الكمومي التقليدية في سباق الارتقاء من الكيوبتات والبوابات الإفرادية إلى آلات تامة النضج وجديرة بأن تسمى «حاسوبا». إن إجراء الحسابات بالعقد والضفائر الكمومية، وهو نهج بدأ وكأنه بديل طلسمي[4]، يمكن أن يُصبح الطريقة السائدة لتنفيذ حوسبة كمومية عملية خالية من الأخطاء. ■

(*) Particles In, Answers Out

(1) substrate material، و substrate هي لوحة سيليكونية عادة يُرسَّب عليها شبه الموصل.

(2) order of magnitude. إذا كان x أكبر من y بثلاث مراتب كِبر، فإن هذا يعني أن x أكبر من y بألف مرة $x = 10^3y$

(3) catch

(4) esoteric لا يفهمه إلا الخاصة (التحرير)

المؤلف

Graham P. Collins

كاتب في المجلة «ساينتفيك أمريكان» وعضو هيئة تحريرها. حصل على الدكتوراه في الفيزياء من الجامعة ستوني بروك. وهو يود شكر «M. H. فريدمان» [مدير المشروع Q في الشركة مايكروسوفت] على إسهاماته في إعداد هذه المقالة.

مراجع للاستزادة

Topologically Protected Qubits from a Possible Non-Abelian Fractional Quantum Hall State. Sankar Das Sarma, Michael Freedman and Chetan Nayak in *Physical Review Letters*, Vol. 94, pages 166802-1–166802-4; April 29, 2005.

Devices Based on the Fractional Quantum Hall Effect May Fulfill the Promise of Quantum Computing. Charles Day in *Physics Today*, Vol. 58, pages 21–24; October 2005.

Anyon There? David Lindley in *Physical Review Focus*, Vol. 16, Story 14; November 2, 2005. **http://focus.aps.org/story/v16/st14**

Topological Quantum Computation. John Preskill. Lecture notes available at **www.theory.caltech.edu/~preskill/ph219/topological.pdf**

Scientific American, April 2006

تتمة الصفحة 61 (طاقة لدفع طائرة فضائية)

الفضاء بغية التثبت من صحة هذه التقانات المهمة أثناء الطيران.

تحديات المستقبل(*)

إذا افترضنا أن الاختبارات الجارية أثناء الطيران على مركبة البيان العملي SED كانت ناجحة، فإن هناك الكثير من الأمور التي يجب القيام بها قبل أن يصبح بالإمكان تحقيق بعض التطبيقات، مثل الإطلاق السريع الاستجابة للأسلحة(1) والطيران الطوافي(2) فوق الصوتي المستدام والوصول إلى الفضاء بتكلفة مستطاعة.

يجب أن تكون محركات سكرامجت قادرة على العمل بأسلوب يمكن الوثوق به على مدى واسع من الأعداد الماخية. وكما ذكرتُ سابقا، فإن التوربينات الغازية الحالية تعد فعالة بين 0 و 3 أو 4 ماخ، في حين يعتبر الصاروخ ضروريا في مراحل من نظام سرعة الطيران تكون فيها السرعة أعلى من 15 ماخ تقريبا. ففي هذه السرعات العالية، تصبح محركات سكرامجت غير قادرة على تحمل التسخين الحراري على الارتفاعات التي يتطلبها سفط كمية الهواء الكافية لحرق الوقود. لذا ينبغي للباحثين أن يبتكروا أنواعا من محركات سكرامجت تستطيع تلبية حاجات التأقلم مع أكبر عدد ممكن من البيئات الملائمة لتغطية المدى الواقع بين 4 و15 ماخ. وفي بعض التطبيقات، يجب أن يكون محرك سكرامجت متكاملا كليا مع دورة منخفضة السرعة مثل دورة التوربين الغازي. ويعني ذلك أن أنظمة السرعة التشغيلية لهذه المحركات يجب أن يتراكب بعضها فوق بعض للسماح بانتقال سلس فيما بينها. ويجب على المهندسين، أيضا، أن يسعوا إلى منع الكتلة الزائدة لأنظمة الدفع المختلفة من أن تكون عبئا إضافيا على أي مركبة متعددة المحركات في الوقت الذي تتحكم فيه بدقة في مدد نوبات عمل كل منها.

لا تستطيع المركبة X-51A، بتصميمها ذي الشكل الهندسي الثابت، أن تخفض تخفيضا جوهريا حدّها التشغيلي. وسوف تكون الهندسة الداخلية المتغيرة لمحرك سكرامجت ضرورية للسماح له بالعمل في أعداد ماخية أدنى من 4 ماخ. ومع أن سلاح الجو الأمريكي والوكالة ناسا ليسا طرفا في الجهود المبذولة ضمن البرنامج SED، فإنهما عرضا في أحد محركات هايتك نموذجا أوليا لمنفذ دخول ذي شكل هندسي متغير، تكون الجنيحات المتحركة فيه قادرة على تغيير أشكالها الانسيابية.

ويمكن لتقانة الوقود أن تحد أيضا من فائدة محرك سكرامجت في كل من طرفي الغلاف التشغيلي الحالي. فقد صممت المركبة X-51A بحيث لا تعمل إلا بعد حصول تسخين بنيوي كاف لتحويل الوقود JP-7 إلى حالته الغازية. وفيما يتعلق بالسرعات الماخية التي هي أكثر انخفاضا، فقد يكون المطلوب أن تعمل غرف احتراق الجيل القادم من محركات سكرامجت مدة وجيزة، باستخدام الوقود السائل أو مادة داسرة تشمل الطورين السائل والغازي معا، قبل أن تتحول إلى العمل باستخدام وقود غازي كليا في المرحلة اللاحقة من الطيران. والمعروف أن السوائل أكثف 1000 مرة من الغازات، وهذا يقتضي ضرورة أن تنفذ مهمة تزويد محرك سكرامجت بالوقود والحفاظ على احتراق ودفع مستقرين خلال مرحلة الانتقال من المادة الداسرة السائلة إلى الوقود الغازي الصرف، بمستوى عال من البراعة. غير أن البرهان على هذه الإمكانية قد تم من خلال فحوص المكونات التي أُجريت في سياق الجهود البحثية المتعلقة بمحرك هايتك. أما في الطرف الآخر من الغلاف، حيث تكون السرعة عالية، فقد تبين أن السعة الحرارية لوقود الطيران النفاث، وحتى لأنواعه التي يكون تفكيكها مصحوبا بامتصاص للحرارة، مثل الوقود JP-7، سوف تتدنى كلما اقتربت السرعة من 8 ماخ. لذلك فإن الطيران بسرعة أكبر سوف يتطلب أنواعا مختلفة جدا من الوقود ومواد متطورة مقاومة للحرارة - أو ربما استخدام مادة الهدروجين على الرغم من اللوجستيات المصاحبة والتحديات التي تفرضها طرق تعبئته في المركبة.

لقد كان التركيز الأولي في برنامج هايتك منصبا على مركبات بحجم الصاروخ وتطلق من الطائرات. أما في التطبيقات الأخرى، مثل الطيران الطوافي فوق الصوتي المستدام والوصول إلى الفضاء، فقد برزت الحاجة إلى مركبات أكبر بكثير. ولايزال البرنامجان، اللذان بدئ العمل بهما عام 2003، وهما البرنامج فالكون التابع للوكالة DARPA، والبرنامج Robust Scramjet التابع لسلاح الجو الأمريكي، يكافحان لحل القضايا المتعلقة بالمحركات التي هي أكبر حجما، وبقدرات الدفق الهوائي، التي تفوق 100 مرة قدرات التجهيزات الحالية للمحرك هايتك.

لقد حققت الجهود الأخيرة، المبذولة في تطوير تقانة محرك سكرامجت، تقدما عظيما في التغلب على عقبات كأداء واجهت تحقيق طيران مستدام عالي السرعة. ونحن نأمل في أن يؤدي هذا التطور المستمر إلى التقدم ببطء، إن لم يكن بخطوات واسعة، كي نتوصل في المستقبل، غير البعيد جدا، إلى تحقيق شيء يشبه محرك الطائرة المتصالبة الجناحين التي نراها في أفلام «*حرب النجوم*». ■

(*) Future Challenges
(1) rapid-response weapons delivery
(2) hypersonic cruise

المؤلف

Thomas A. Jackson

هو نائب رئيس شعبة العلوم في قسم الدفع الفضائي بمديرية الدفع في مختبر الأبحاث التابع لسلاح الجو الأمريكي بأوهايو، حيث يعمل على تحديد وجهة الدراسات العلمية في التقانة المتقدمة لمحركات الدفع التي تعمل بسفط الهواء. وقد حصل على الدكتوراه في الهندسة الميكانيكية من جامعة كاليفورنيا في إيرفاين عام 1985، وعلى الماجستير في إدارة التقانة من قسم الإدارة في كلية سلون التابعة لمعهد ماساتشوستس للتقانة MIT. وانصبت أبحاثه، في المقام الأول، على تقانات الاحتراق وحقن الوقود في محركات الدفع.

مراجع للاستزادة

Ramjets. Edited by Gordon L. Dugger. American Institute of Aeronautics and Astronautics Selected Reprint Series, 1969.

A Procedure for Optimizing the Design of Scramjet Engines. P. J. Waltrup, F. S. Billig and R. D. Stockbridge in *Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol. 16, No. 3, pages 163–171; May–June 1979.

Research on Supersonic Combustion. F. S. Billig in *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 9, No. 4, pages 499–514; July–August 1993.

Hypersonic Airbreathing Propulsion. William H. Heiser, David T. Pratt, Daniel H. Daley and Unmeel B. Mehta. American Institute of Aeronautics and Astronautics Education Series, 1994.

Investigation of Scramjet Injection Strategies for High Mach Number Flows. D. W. Riggins, C. R. McClinton, R. C. Rogers and R. D. Bittner in *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 11, No. 3, pages 409–418; May–June 1995.

Scientific American, August 2006

تطبيقات متزايدة الاستنتات الوعائية(*)

لقد انتشر زرع الاستنتات(1) (الوشائع) مؤخرا انتشارا واسعا (والاستنتات هي أسطوانات معدنية دقيقة مخلخلة تستخدم لتوسيع الشرايين المريضة المتضيقة) مما دفع بعض الأطباء إلى القول بأن ثمة إفراطا اليوم في إجراء عملية زرع الاستنتات. لكن المدافعين عنها يقولون إن هذه الاستنتات ما فتئت في تطور مستمر منذ عشرين سنة، وإنها أصبحت تمثل خيارا مهما بديلا عن عمليات القلب المفتوح. فطوال عقود مضت كان مرضى الشرايين الإكليلية، الذين تضيقت شرايينهم بفعل توضع ترسبات شحمية (عصائد شريانية)، بحاجة إلى أن تجرى عليهم عمليات قلبية يستخدم فيها جزء من شريان أو وريد من المريض نفسه كمجازة(2) وعائية لتخطي هذه التضيقات. وكذلك كان الجراحون يجرون عمليات مشابهة على المصابين بانسدادات شريانية في نواحٍ أخرى من الجسم، أو كانوا يفتحون الشريان المغلق لتنظيفه من الترسبات. لكن عندما بدأ **رأب الأوعية** angioplasty وتوسيع الشرايين المريضة بالبالون، قل احتياج مرضى الشرايين إلى عمليات القلب المفتوح: فالبالون يُدخل بالتخدير الموضعي بوساطة **قثطار**(3) catheter رفيع في الشريان، ويُدفع إلى مكان الإصابة، حيث يُنفخ ليضغط على العصيدة ويحطمها فيفتح بذلك المجرى المتضيق ويسمح للدم بالجريان. ومع ذلك فكثيرا ما كان الشريان يعود للتضيق برد فعل منعكس من جدار الشريان، أو نتيجة نمو نسيج ليفي ارتكاسي فيه.

وأما عملية زرع الاستنت الشرياني فهي عملية شبيهة بعملية التوسيع بالبالون، إنما تهدف إلى الإبقاء على الشريان مفتوحا [*انظر الشكل في الصفحة المقابلة*]. وأهم الشرايين المستهدفة في هذه العملية بلا شك هي شرايين القلب الإكليلية التي تغذي العضلة القلبية؛ لكن الشرايين الأخرى صارت أيضا تعالج بهذه الطريقة بشكل متزايد. وقد كانت الاستنتات الأولى (التي رُخصت للاستعمال في بواكير التسعينات) مصنوعة من الفولاذ الذي لا يصدأ. ثم ظهرت الاستنتات التي تتوسع ذاتيا والمصنوعة من خليطة معدني النيكل والتيتانيوم، تلك الخليطة التي لها خاصية الاحتفاظ على أي تبدل في الشكل. أخيرا رُخّص في الولايات المتحدة عام 2003 للاستنتات المغطاة بمركبات (بوليميرات) تسمح بتحرير تدريجي لأدوية مانعة لنمو النسج [ذلك النمو المسؤول عن نكس التضيقات الشريانية]، مما روج كثيرا لاستخدام الاستنتات.

ويقول الناقدون إن الأطباء يستخفون بالأخطار المحتملة لهذه الاستنتات ويتعجلون في إدخالها إلى شرايين المرضى. لكن مدير مركز الأوعية في مستشفى ماساتشوستس العام في بوسطن <M. جاف> يقول: «لقد حققت الاستنتات ثورة في العناية بالمرضى.» فبعد أن كان نحو 30% من المرضى الذين عولجوا بالاستنتات العادية يتعرضون لنكس في تضيق شرايينهم، هبطت هذه النسبة إلى أقل من 10% عندما استخدمت الوشائع الدوائية. ويلحظ <جاف> أن هناك براهين علمية ودراسات مكثفة تثبت أن الاستنتات الإكليلية **المحررة للأدوية** drug-eluting هي الأنجع في معالجة التضيقات الإكليلية. أما بالنسبة إلى التطبيقات الأخرى على الشرايين المحيطية، فمع أن الاستنتات تبدو مفضلة على غيرها من طرق العلاج، فإن تلك الملاحظة مازال يعوزها الإثبات العلمي.

يُسارع مصنعو الأدوات الطبية في مجاراة تزايد الطلب على الاستنتات. ويصرح <B. فيرث> [نائب الرئيس للشؤون الطبية في مؤسسة كورديس] أن شركته تقوم حاليا بتطوير استنتات خاصة بتوسيع الشريان الفخذي السطحي(4) بالفخذ، والشريان المأبضي(5) تحت الركبة. ويقول <فيرث> «إن استخدام الاستنتات يتزايد باطراد، وهذه النزعة ستستمر على الأغلب. ■

<M. فيشيتي>

(*) VASCULAR STENTS

(1) ج: استنت (أو وشيعة). تعريب للمصطلح stent الذي ينسب إلى طبيب الأسنان الإنكليزي Charles Stent (1807 - 1885) الذي اكتشف مادة صلبة تتلين بالحرارة وتستعيد صلابتها بالبرودة، وتستعمل في طب الأسنان لإجراء الطبعات وفي الجراحة لتثبيت الطعوم.

(2) bypass

(3) أداة على شكل أنبوب أجوف تستخدم لإدخالها في القنوات أو الأوعية الدموية لحقن أو سحب السوائل. وتسمى عملية استخدامها قثطرة (أو قسطرة).

(4) superficial femoral artery

(5) popliteal artery

الشرايين التي تستخدم فيها الاستنتات تشمل **الشرايين الإكليلية** coronary (للقلب)، والسباتية carotid (للدماغ)، **والحرقفية** iliac (للطرفين السفليين)، **والكلوية** renal (للكليتين)

الشريان السباتي

الشريان الإكليلي

الشريان الكلوي

الشريان الحرقفي

■ **التقاط فُتات العصيدة**[1]: إن التوسيع بالاستنتات يحطم العصيدة الشريانية، مما يُطلق كسرات bits من مخلفات هذا الحطام. وتتحمل معظم أعضاء الجسم انطلاق هذه الكسرات من المخلفات العصيدية من دون آثار جانبية تذكر، وذلك على حد قول «ل. نيلسون هوبكنز» [رئيس قسم الجراحة العصبية بجامعة ولاية نيويورك]. إلا أن هذه المخلفات قد تتسبب في حدوث سكتة stroke دماغية إذا توضعت في شريان يتفرع إلى الدماغ. لذلك اخترعت عدة شركات أدوات ترشيح خاصة لالتقاط هذه الكسرات العصيدية في حالات توسيع أحد الشرايين السباتية بالاستنت (*انظر الشكل في الأسفل*). وفي بعض الحالات الأخرى يستخدم البالون لإغلاق مجرى الدم في الشريان خلال عملية التوسيع، ثم تقوم قثاطر خاصة بشفط مخلفات التوسيع قبل «تفريغ» البالون وإعادة جريان الدم الطبيعي.

■ **لمنع التخثر**[2]: قد تتشكل الخثرات الدموية blood clots في أي مكان تجرى فيه عملية داخل الشريان أو حول أي أداة تزرع ضمنه؛ لذلك توصف للمرضى الذين تجرى عليهم عملية التوسيع، أدوية تمنع صُفيحات platelets الدم من التجلط وتشكيل الخثرات لفترة شهر إلى سنة، إضافة إلى الأسبرين الذي هو عماد المعالجة الدوائية المضادة للصفيحات.

■ **مقاس واحد لا يصلح لجميع المرضى**[3]: يُحدد الاستنت بحسب حجم الشريان المعالج، الذي يقدر أولا بالأشعة ثم أثناء عملية التوسيع ذاتها ومعظم الشرايين الإكليلية تراوح أقطارها ما بين 2 و 4 مم، في حين تراوح أقطار الشرايين السباتية ما بين 4 و 6 مم. وتفضل الاستنتات التي توسع بالبالون في عمليات توسيع الشرايين الإكليلية، لأن حجمها في النهاية يحدده حجم البالون المستعمل. أما بالنسبة إلى الشرايين السباتية فتفضل الاستنتات التي تتوسع من ذاتها لأنها مقاومة للضغط. وكما هو معروف تقع الشرايين السباتية قريبا من جلد العنق، فإذا استخدمت فيها الاستنتات العادية كانت معرضة للتضييق إذا أصابها أي ضغط خارجي.

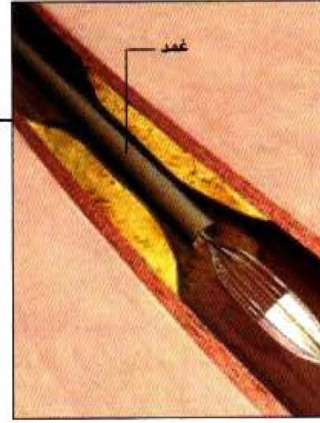
إن الاستنتات القابلة للتوسع بالبالون، والتي تستعمل عادة لتوسيع الشرايين الإكليلية، تُجمع على البالون وتدفع بقثطار إلى موضع الشريان المتضيق وينفخ البالون (ربما عددا من المرات) ليفتح الاستنت ويحطم العصيدة الشريانية ويضغطها على جدار الشريان. بعد ذلك يُفرّغ البالون ويسحب بالقثطار.

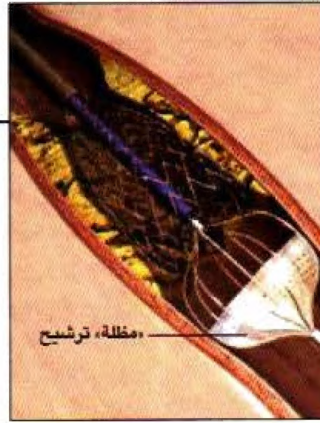


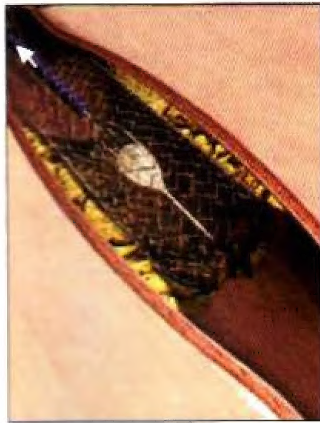


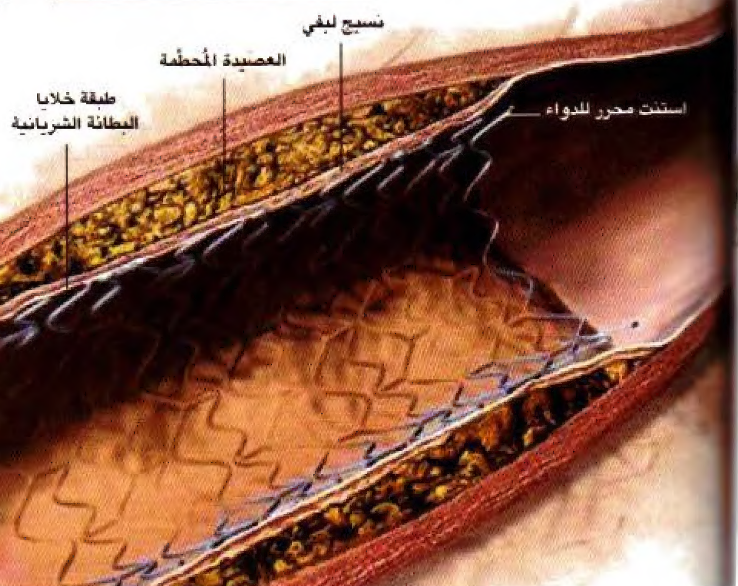


تستخدم الاستنتات القابلة للتوسع الذاتي في معظم عمليات توسيع الشرايين السباتية carotid. يُدفع الاستنت داخل غمد sheath ضيق. فإذا سحب الغمد توسع الاستنت ذاتيا. ويمكن أن يستخدم بالون فيما بعد لزيادة تثبيت العصيدة the plaque والاستنت. كذلك يمكن أن تستخدم «مظلة» ترشيح خلال عملية التوسيع لالتقاط الكسرات التي قد تنفصل عن العصيدة وتغلق أحد شرايين الدماغ، مسببة السكتة الدماغية.









تولد العصيدة الشريانية المحطمة[4] ردود فعل نسيجية تؤدي إلى تضييق المجرى (لمعة الشريان)، ويعالج هذا الأمر باستعمال الاستنتات المحررة للأدوية المغطاة ببوليمير polymer قادر على تحرير... على مدى عدة أسابيع يمنع تشكل طبقات جديدة من النسيج الليفي... خلايا البطانة الشريانية التي عادة ما تبطن الوعاء... تغطي الخلايا دعامات الاستنت مما يقلل... تجمع الصفيحات عليها وتشكل الخثرات...

(1) plaque catcher

(3) one size does not fit all

التهابات الجسم(*)

إن معرفة كيف يمكن للنيكوتين أن يوقف الالتهاب قد تساعد على ابتكار أدوية جديدة.

أصبحت صورة النيكوتين قَيْدَ التعديل والتغيير على الأقل من وجهة النظر الطبية البيولوجية، فقد وجد الباحثون أنّ هذه المادة يمكنها أن تُلَطِّف أعراض بعض الأمراض كداء الزايمر والتهاب القولون القرْحي. وعلى أية حال فقد بقيت كيفية مقاومة النيكوتين لهذه الأمراض غير واضحة. ولكن في الوقت الحاضر وبعد دراسة الإنتانات أظهر <L. ألُّو> [من مستشفيات جامعة الشاطئ الشمالي في منهاسيت، نيويورك] بالأدلة أنّ السُّبُل الكيميائية البيولوجية للنيكوتين يمكنها أنْ تؤدي إلى إنتاج المزيد من الأدوية القوية المضادة للالتهاب.

إنّ الإنتانَ الدمويَّ أكثرُ حالات الالتهاب إماتة، وهو غزو بكتيري للدم، وهو السبب الثالث من أسباب الوفاة في العالم المتقدم، ويعتبر مسؤولا عن 10% من الوفيّات في الولايات المتحدة سنويا. وتسبب العدوى جزءا من التخريب النسيجي، إلاّ أنّ الذي يجعل المصابين في حالة خطرة هو النمط العنيف لاستجابتهم المناعية.

تنتج البلاعم كمّيّات كبيرة من طلائع الالتهاب التي تسمى **السيتوكينات** cytokines، وتؤدي هذه الاستجابة المناعية المتفاقمة إلى تخريب النسج. وفي النهاية كثيرا ما يموت المريض بسبب الخلل الوظيفي القلبي الوعائي وفشل وظيفي يصيب عدة أعضاء.

لقد وجد <ألُّو> ومساعدوه شيئا متميزا: يمكن للنيكوتين أن يمنع هذه الاستجابة الالتهابية المفرطة إلى درجة تراجع حالة الإنتان لدى الفئران. وبأقصى ما يمكن من استمرارية مضادات الالتهاب فإنّ هذه المادة تعتبر قوية. وفي مؤتمر مؤسسة نوفارتس المنعقد بلندن في الشهر 2 صرّح <ألُّو> قائلا: «إنّ النيكوتين ينقر على وتر الآليات المضادة للالتهاب الخاصة بالجسم ذاته وهذا من جماليات أسلوبنا. فباستعمال النيكوتين نقوم بتكرار الآليات الفيزيولوجية المنتقاة بالتطور لتعديل نظام الجهاز المناعي.»

يُحاكي النيكوتينُ بشكل خاص عملَ الأستيل كولين، الذي يُعتبَرُ بمثابة سندريلا الناقلات العصبية، فلقد تم تجاهل دوره بشكل كبير خلال سنوات، ثم لمعَ نجمه بدور البطولة، حيث تبين أنه يربطُ الأعصابَ بالجملة المناعية. وتسيطر الجملة العصبية على شدة الالتهاب التي تحصد خلايا أجسامنا بوساطة مادة الأستيل كولين. ولا توجد مستقبلات الأستيل كولين في نهايات الخلايا العصبية وحدها، بل توجد أيضا على سطح الخلايا المناعية. ويربطُ الأستيل كولين بين هذه المستقبلات وينشطُها، ما يسمح بالتخاطب المتبادل بين الدماغ والجملة المناعية.

«لقد بات هذا الأمرُ ظاهرا تماما،» كان ذلك تعليق <W. دي جونگ> [من المركز الطبي الأكاديمي في أمستردام، الذي درس كيفية استجابة البلاعم (الخلايا البالغة) للأستيل كولين]. وقد أبدى ملاحظته بقوله: «يبدو أنّ المدخنين الذين يعانون التهاب القولون القرحي يستفيدون من ممارستهم عادة التدخين، ومنه يمكن ملاحظة أنّ النيكوتين يُلَطِّفُ الأمراض الالتهابية، ولكن لا يستطيع أحد التعامل مع ذلك الموضوع تماما.»

ويمكن أن يكون فريق <ألُّو> قد قدم تفسيرا في الوقت الحاضر للتأثيرات الإيجابية المستفادة من النيكوتين في بعض الأمراض المتنوعة، مثل الفصام وداء الزايمر وداء باركنسون ومتلازمة توريت والتهاب القولون القرحي. وفي التجارب المختبرية، أظهر <ألُّو> أنّ النيكوتين يرتبط بالمستقبلات الخاصة به الموجودة على سطح الخلايا البالغة ويمنعها من قذف السيتوكينات الالتهابية، ويعتبر هذا القَمْعُ فعالا جدا. كما حدَّدَ الباحثون مستقبلات نوعية فرعية تسمى مستقبلات الأستيل كولين الألفائية 7، التي يرتبط بها النيكوتين في البلاعم لإيقاف إنتاج السيتوكينات.

ويبقى الحديث عن أن يكون النيكوتين دواء أمرا غير معقول نتيجة سُمِّيَّته. وبغض النظر عن طبيعته التي قد تسبب الإدمان، فإنه قد يسبب مشكلات وعائية قلبية، كما يسهم في حدوث السرطان. ولذلك يقول <ألُّو>: «لا يوجد أحد يتطلع إلى استخدام النيكوتين لمعالجة الالتهاب.. ونحن نريد تصميم مركبات نوعية نموذجية تستهدف هذه المستقبلات لتعطي الفوائد التي يحققها النيكوتين من الفعالية المضادة للالتهاب، مع التخلص في الوقت ذاته من سميته كتأثير جانبي له.»

«هذه إحدى القصص أو المآثر العظيمة في علم المناعة التي جرت في السنوات القليلة الماضية، ولا يوجد سؤال حول ذلك.» هكذا قال خبير الرعاية الطبية الفائقة في جامعة بتسبورگ <M. فينك>. وقد تكون المعالجةُ بمركب انتقائي يشبهُ النيكوتين المعالجةَ الواعدة، ليس فقط ضد الإنتان بل ضد الأمراض المزمنة البطيئة، بما في ذلك أمراض القلب والسرطان والسُّكَّري. وإنّ المهمّةَ المطروحة بين أيدينا هي إيجاد أفضل بديل للنيكوتين، وتبقى أطباق بتري المُعَوَّلُ عليها في رصد ذلك الهدف، حسب تعبير <ألُّو>. ■

<A. ميلتون>، مقيمة في لندن



النيكوتين مضادُ التهاب فعّال وقوي، لكنه شديد الخطورة إلى درجة تمنع استعماله في العلاج.

لمحة عن النيكوتين(**)

يمكن للنيكوتين في عمله كمضاد التهاب فعال أنْ يثبط استجابةً مناعيّةً خطرة، لكنه خطر جدا باستخدامه في العلاج. ولحسن الحظ يمكن أنْ يوجد له بدائل، وقد طوّرت شركات صيدلانية أدويةً مشابهة للنيكوتين مثل GTS-21 الذي صمم لتنشيط مستقبلات الأستيل كولين الألفائية 7 في أدمغة المصابين بداء الزايمر، لكن التجارب السريرية فشلت في إظهار فائدة واضحة لهذه الأدوية، ولذلك سُحبت. وربما لم تكن هذه المركبات قادرة على عبور الحائل (الحاجز) الدموي الدماغي، وهو الأمر الذي سيعتبر ميزة لها كونها مركبات مضادة للالتهاب، إذ يمكن عندها استهداف النسج المحيطة بالدماغ مع تجنب الدماغ بذاته. ولقد بدأ الباحثون باختبار مثل هذه البدائل لمقاومة الالتهاب.

(*) BODY BLAZES

(**) A Nick of Nicotine